

Rapports PSS N° 30 (Chapitre 1 - 4)

Production Soudano-Sahélienne (PSS)
Exploitation optimale des éléments nutritifs en élevage

Projet de coopération scientifique

Analyse de l'utilisation de terre à l'aide de la programmation linéaire à buts multiples

Manuel de cours

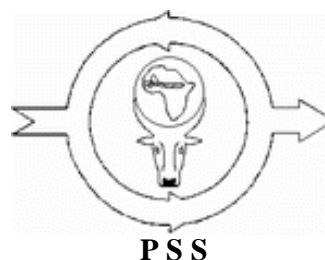
E.J. Bakker, T. van Rheenen ¹⁾, M.S.M. Touré, K. Sissoko ²⁾,
M.K. van Ittersum, N. de Ridder ³⁾

¹⁾ Adresse: AB-DLO, B.P. 14, 6700 AA Wageningen, les Pays-Bas

²⁾ Adresse: IER, B.P. 258, Bamako, Mali

³⁾ Adresse: LUW, B.P. 430, 6700 AK Wageningen, les Pays-Bas

IER, Bamako
AB-DLO, Wageningen, Haren
DAN-UAW, Wageningen



Rapports PSS N° 30

Wageningen, 1996

Rapports du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS)

Numéro 30

Table des matières

- [1. Introduction au cours](#)
 - [1.1. Objectifs](#)
 - [1.2. Organisation du manuel](#)

- [2. Pourquoi des études AUT ?](#)
 - [2.1. Introduction](#)
 - [2.2. Méthodologie générale](#)
 - [2.3. Exemples de quelques applications de la méthodologie pour des études exploratoires d'utilisation des ressources naturelles](#)
 - [2.4. Arrière-plan et motifs de l'étude du projet PSS au Mali](#)
 - [2.4.1. Généralités sur l'économie du Mali](#)
 - [2.4.2. Le projet PSS](#)
 - [2.5. Quatre perspectives pour les zones rurales dans la Communauté Européenne : Arrière-plan et motifs](#)
 - [2.6. Exercices](#)
- [3. Programmation Linéaire et Analyse à Critères Multiples](#)
 - [3.1. Introduction](#)
 - [3.2. Programmation Linéaire \(PL\)](#)
 - [3.2.1. Exemple](#)
 - [3.2.2. Variables de décision, contraintes et fonction objectif](#)
 - [3.2.3. Formulation](#)
 - [3.2.4. Transformations](#)
 - [3.2.5. Suppositions et restrictions](#)
 - [3.2.6. Solutions](#)
 - [3.2.7. Algorithme-Simplex](#)
 - [3.2.8. Analyse Post-optimum ou analyse de sensibilité](#)
 - [3.2.9. Exemple d'un problème de programmation linéaire dans un champ commun du village de Tagota dans la région de Mara, Tanzanie](#)
 - [3.2.10. Logiciels pour résoudre des problèmes PL](#)
 - [3.3. Optimisation à critères multiples](#)
 - [3.3.1. Attributs, objectifs, cible et and buts](#)
 - [3.3.2. L'optimum de Pareto ou solutions efficaces](#)
 - [3.3.3. Le compromis entre critères](#)
 - [3.3.4. Techniques de prise de décision à critères multiples](#)
 - [3.4. Deux logiciels d'optimisation](#)
 - [3.4.1. LP 88](#)
 - [3.4.2. XPRESS-MP](#)
 - [3.5. Exercices](#)
- [4. Méthodologie pour des études exploratoires d'utilisation de la terre](#)
 - [4.1. Définition du système](#)
 - [4.2. Evaluation de la ressource terre](#)
 - [4.3. Quantifier des relations intrants/extrants : concepts et définitions](#)
 - [4.3.1. Introduction](#)
 - [4.3.2. L'approche du cible](#)

- [4.3.3. Niveau de production, situation de production, technique de production et orientation de production](#)
- [4.3.4. Niveau d'agrégation, horizon temporel et relations intrants/extrants](#)
- [4.3.5. Quantification des intrants non échangeables](#)
- [4.3.6. Quantification des intrants échangeables](#)
- [4.3.7. Emissions et immissions](#)
- [4.3.8. Fonctions de production ou paquets technologiques](#)
- [4.4. Identification et quantification des contraintes](#)
- [4.5. Vues politiques et fonctions objectifs](#)
- [4.6. Programmation Linéaire Itérative à Buts Multiples](#)
- [4.7. Génération de scénarios d'utilisation de la terre](#)
- [4.8. Analyse de sensibilité](#)
- [4.9. Discussion général](#)
- [4.10. Exercices](#)
- [5. Etude de cas de la Communauté Européenne](#)
 - [5.1. Définition du système](#)
 - [5.2. Evaluation de la terre](#)
 - [5.3. Relations intrants/extrants](#)
 - [5.4. Contraintes](#)
 - [5.5. Vues politiques et fonctions objectifs](#)
 - [5.6. Scénarios d'utilisation de la ressource terre](#)
 - [5.7. Exercices](#)
- [6. Etude du projet PSS sur la zone soudano-sahélienne du Mali](#)
 - [6.1. La définition du système](#)
 - [6.2. Ressources de la zone soudano-sahélienne du Mali](#)
 - [6.2.1. Introduction](#)
 - [6.2.2. Les sous-zones et les unités agro-écologiques](#)
 - [6.2.3. Les ressources par sous-zone](#)
 - [6.2.4. Ressources du cercle de Koutiala](#)
 - [6.2.5. Environnement socio-économique et institutionnelle à Koutiala](#)
 - [6.3. Quantifier les relations intrants-extrants pour les activités de production](#)
 - [6.3.1. Introduction](#)
 - [6.3.2. Les activités culturelles](#)
 - [6.3.2.1. Critères de définition](#)
 - [6.3.3. Les activités d'élevage](#)
 - [6.3.3.1. L'élevage de troupeau](#)
 - [6.3.3.2. Qualification et quantification des intrants fourragers](#)
 - [6.3.3.3. L'embouche](#)

- [6.3.4. Les activités de transformation](#)
 - [6.3.4.1. La jachère](#)
 - [6.3.4.2. Le pâturage](#)
 - [6.3.4.3. Le brûlage des résidus](#)
 - [6.3.4.4. L'enfouissement des résidus](#)
 - [6.3.4.5. Le paillage](#)
 - [6.3.4.6. La production de litière](#)
 - [6.3.4.7. Le transport des résidus à la ferme](#)
 - [6.3.4.8. Le transport de matière organique au champ](#)
- [6.3.5. Le générateur de coefficients techniques \(GCT\) du projet PSS](#)
 - [6.3.5.1. Introduction](#)
 - [6.3.5.2. Les types d'activités](#)
 - [6.3.5.3. Les fichiers de calcul principaux et les fichiers auxiliaires](#)
 - [6.3.5.4. Préparer et démarrer le GCT](#)
 - [6.3.5.5. Voir/Examiner les fichiers de calcul et de données de base](#)
 - [6.3.5.6. Générer les coefficients pour un \(grand\) nombre d'activités](#)
 - [6.3.5.7. Exercices pour le Générateur des Coefficients Techniques](#)
- [6.4. Restrictions](#)
- [6.5. Objectifs de développement et environnement économique](#)
- [6.6. Le modèle PLBM pour une seule zone climatique](#)
- [6.7. Développement d'une étude de cas](#)
- [References](#)

« The research for this publication was financed by the Netherlands' Minister for Development Co-operation. Citation is encouraged. Short excerpts may be translated and/or reproduced without prior permission, on the condition that the source is indicated. For translation and/or reproduction in whole the Section DST/SO of the aforementioned Minister should be notified in advance (P.O. Box 20061, 2500 EB The Hague). Responsibility for the contents and for the opinions expressed rests solely with the authors ; publication does not constitute an endorsement by the Netherlands' Minister for Development Co-operation ».

1. Introduction au cours

Au début de ce cours Gérard Winstanly (1650) est cité :

« N'est-ce tout le monde qui s'efforce de jouir la terre ? La noblesse le veut, le clergé le veut et acheter et vendre est l'art par lequel les gens essaient de prendre la terre l'un de l'autre. »

La citation est vraiment vieille, mais le message qu'il a essayé de transmettre, que la terre fut une nécessité de base pour toutes les sections de la société, a été pertinente de mémoire d'homme, et il l'est toujours. Cela implique qu'il y a très souvent plusieurs utilisations intentionnées pour la terre. Evidemment, cela peut mener à des conflits. Un très ancien exemple est la suivante :

« Abram était très riche en cheptel, en argent et en or. Il se rendit par étapes du Negueb jusqu'à Béthel et Ai, à l'endroit où était l'autel qu'il avait fait précédemment ; et là, Abram invoqua le nom de l'Éternel. Loth, qui accompagnait Abram, avait aussi du petit et du gros bétail, ainsi que des tentes. Le pays était insuffisant pour qu'ils restent ensemble, car leur biens étaient si considérables qu'ils ne pouvaient rester ensemble. Il y eut querelle entre les bergers des troupeaux d'Abram et les bergers des troupeaux de Loth.

Abram dit à Loth : Qu'il n'y ait pas, je te prie, de dispute entre moi et toi, ni entre mes bergers et tes bergers ; car nous sommes frères. Tout le pays est devant toi. Sépares-toi donc de moi : si tu vas à gauche, j'irai à droite, si tu vas à droite, j'irai à gauche. » (La Bible, Genèse 13 : 2-9)

Dans nos jours la terre est devenu encore beaucoup plus rare. Presque nulle part est-il encore possible de mettre fin aux conflits concernant la terre par une simple séparation comme dans le cas d'Abram et Loth, car dans la plupart du monde il n'y a plus de nouvelle terre qui peut être utilisé. Cette observation implique que on peut s'attendre a plus de conflits, qui seront de plus en plus difficile a résoudre. Une deuxième implication est qu'aujourd'hui la terre est utilisée plus intensivement, ce qui emmène dans pas mal de cas une dégradation de cette ressource. La dégradation d'une parties des terres augmente la pression sur les terres de bonne qualité, et ainsi on risque de finir par une spirale descendante. Au fur et à mesure que la terre devient plus rare, il devient donc plus important que son utilisation soit durable. Non seulement la génération d'aujourd'hui, mais aussi les générations futures doivent avoir la possibilité de jouir les bénéfices que donne la terre.

Partout dans le monde beaucoup d'attention a été donnée aux techniques d'analyse pour améliorer la prise des décisions concernant l'utilisation de terre et d'autres ressources naturelles, en tenant compte des objectifs conflictuels et de la durabilité. Ce document et la formation basée là-dessus essaient également d'y jouer son rôle en introduisant les participants aux derniers techniques développés. Dans le titre retenu pour ce document le mot « analyse » est utilisé au lieu du mot « planification » bien que ce mot soit employé par beaucoup d'auteurs. Le terme « planification de l'utilisation de terre » (land use planning) suggère trop souvent que les résultats de l'étude seront convertis en action tel que l'objectif désiré sera atteint. Tout le monde impliqué dans de telles études sait quand même que ce ne soit pas le cas. De telles études augmentent la compréhension de l'utilisation actuelle de la terre ou des possibilités pour son utilisation future. Ainsi ils contribuent à la discussion politique et à la prise de décision y concernant, mais presque jamais sont-ils suivis directement par un plan d'action concret. En effet, ce n'est pas le chercheur et souvent même pas le décideur politique qui prend des décisions concernant l'utilisation de la terre. Finalement c'est au niveau de la ferme que les décisions concernant l'utilisation de la terre sont prises, surtout dans les pays en voie de développement. Raison donc pourquoi le terme « analyse de l'utilisation de terre » (AUT) est préférable.

Un deuxième remarque concernant le titre est que l'analyse traité ne se limite pas à l'utilisation de la terre seule, mais, en principe, aussi de l'utilisation des autres ressources naturelles et, par exemple, la main d'oeuvre. Pour cette raison il pourrait être préférable de remplacer le mot « terre » par « ressources naturelles ». La raison principale pourquoi cela n'est pas fait est de rester proche au vocabulaire anglais où il y a toujours été question de « land use ». Une autre justification est que les autres ressources naturelles et leur utilisation sont toujours liées à celle de la terre. Ainsi il faut entendre par « terre » la terre elle-même et tout ce qu'elle porte ou contient comme autre ressource (par exemple : arbres, eau, nutriments, matière organique).

1.1. Objectifs

Des développements récents dans la recherche ont généré des outils utiles pour les AUT. Ce cours se limitera à l'AUT pour des objectifs agricole. Néanmoins il sera possible d'indiquer des effets pour des objectifs non-agricoles. La terre utilisée pour l'agriculture ne peut être utilisé pour d'autres activités. Comme Fresco (1994) le dit :

« Pendant la dernière décennie, l'emploi combiné des modèles de simulation, des systèmes- experts informatiques, et des systèmes d'information géographique,

des différents types de bases de données et des techniques de planification à buts multiples nous ont permis de formuler des options pour l'utilisation de terre de façon beaucoup plus précise et variée. Pas comme un plan directeur unidimensionnelle, mais comme des scénarios pour des choix politiques. »

La présentation des scénarios n'est pas un nouveau technique. Elle est déjà connue en démographie et dans la planification économique. Scénarios ne doivent pas être confondus avec des prédictions, car ils ne prédisent rien, mais ils permettent d'explorer les options techniques basées sur des suppositions et des objectifs explicites. Plus précisément, le coût d'atteindre un objectif peut être exprimé en termes de la réduction de la mesure dans laquelle un autre objectif peut être atteint. Ainsi les décideurs politiques et les utilisateurs de la terre sont forcés de faire des choix explicites. Autrement dit, des modèles d'utilisation de terre peuvent aider à rendre plus visible les conflits éventuels.

Dans le contexte du projet PSS un modèle a été développé qui peut être utilisé comme outil pour explorer les options de l'utilisation de terre durable dans l'agriculture de la zone soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. Le modèle peut être utilisé pour démontrer les conflits entre les différents objectifs.

L'objectif général de ce cours est d'utiliser l'expérience du projet PSS et familiariser les participants du cours avec les techniques et la méthodologie développée au sein du projet. Ainsi un des objectifs principaux du Projet PSS, de renforcer la capacité de recherche malienne, sera servi.

Pour atteindre l'objectif général, on s'efforcera pendant le cours de :

1. décrire et expliquer aux participants les derniers techniques d'analyse dans le terrain de l'AUT
2. renforcer la compréhension de la connaissance ainsi acquiert à travers des exercices
3. démontrer comment ces techniques ont été utilisés. Pour ce faire, on traitera deux études de cas. La première, traitée dans les chapitres [2.5](#) et [5](#), est une étude conduite par la le Conseil Scientifique néerlandais pour la Politique Gouvernementale. La deuxième (chapitres [2.4](#) et [6](#)) a été conduite par le projet PSS.

1.2. Organisation du manuel

La question clé qui sera adressée dans le [chapitre 2](#) est : Pourquoi AUT La discussion abordée déjà ci-dessus sera élaborée dans le chapitre 2 à travers une discussion générale et à travers les motivations des deux études de cas mentionnées ci-dessus.

En considérant des études AUT, on rencontre beaucoup de techniques d'analyse. Quelle technique d'analyse est la plus appropriée dépend des objectives de l'étude. Pendant ce cours on introduira les participants brièvement à un nombre de techniques. On insistera seulement aux techniques qui peuvent être utilisées pour analyser les options stratégiques de développement. Une attention particulière sera donnée à la Programmation Linéaire (PL) et à la prise de décision sur la base de plusieurs critères (PDPC). Les deux techniques sont fréquemment utilisées dans des études AUT et il est essentiel de les comprendre.

Des problèmes à adresser avec les AUT sont devenus tellement complexes qu'il est presque impensable de les résoudre sans utilisation d'ordinateur et sans logiciels sophistiqués. Pendant ce cours deux logiciels sont utilisés, à savoir LP88 et XPRESS. Le premier sera utilisé pour introduire la PL, le dernier pour exercer avec des problèmes plus complexe. Les deux logiciels seront expliqués dans le [chapitre 3](#).

Dans le [chapitre 4](#) de ce manuel la méthodologie générale des études AUT est traitée. Comme a été mentionné dans l'introduction, plusieurs études AUT ont été exécutées, dont deux seront traitées. Concernant l'étude « L'espace pour choisir », l'étude sur la Communauté Européenne (CE), on traitera surtout la méthodologie suivie et les résultats obtenus par l'étude. Le [chapitre 5](#) est alloué à cette étude.

L'étude du projet PSS sera traitée en plus de profondeur dans le [chapitre 6](#). Les participants au cours feront des exercices avec le générateur des coefficients techniques (GCT) et avec le modèle de PL du projet PSS. Ces exercices donneront aux participants plus de perspicacité concernant les points forts et les faiblesses de telles études. La fin du chapitre 6 introduira l'étude de cas à développer par les participants. En utilisant la connaissance accumulée pendant la première partie du cours, les participants :

- établiront une proposition d'étude pour une région spécifique du Mali. Cette proposition sera présentée et discutée.
- généreront les données requises en utilisant le générateur des coefficients techniques,
- développeront un modèle de programmation à buts multiples (PLBM),
- conduiront une analyse de sensibilité, et, finalement
- écriront un compte-rendu, à présenter et à discuter en session plénière

Avec la disponibilité du GCT et du modèle PLBM il doit être possible d'exécuter cette étude de cas rapidement, en se concentrant sur les vues politiques, la quantification des objectifs quantifiés et le développement des scénarios.

2. Pourquoi des études AUT ?

2.1. Introduction

Face à la future, tout le monde est en faveur d'un développement durable et il est probable que les gens l'utilisent comme principe directeur pour leur opinion sur le développement futur et l'utilisation des ressources naturelles. Néanmoins, tout le monde semble avoir sa propre idée sur ce qu'est la durabilité. Le terme « développement durable » est difficile à rendre opérationnel, à cause des dimensions diverses de durabilité (dimensions écologiques, économiques, et sociales), les incertitudes concernant ces dimensions, et la difficulté de peser conséquemment les risques environnementaux, économiques, et sociales. Ce n'est donc pas étonnant qu'il y ait beaucoup de perceptions d'un développement durable. Ces différentes perceptions peuvent être classifiées selon les perceptions des risques environnementales et sociales, c'est-à-dire la possibilité de réaliser des changements sociaux (WRR, 1994).

Des études d'analyse de l'utilisation de terre (AUT) sont des études exploratoires qui ont pour objet de révéler et de quantifier les enjeux entre les différentes perceptions du développement durable et les objectifs conflictuels impliqués. Ils servent à montrer les conséquences des différents objectifs de développement aux décideurs politiques et ainsi à les aider de les formuler.

Dans les études AUT exploratoires d'utilisation des ressources naturelles les possibilités futures sont attendues avec un esprit ouvert. Dans de telles études le passé n'est pas utilisé comme mesure pour la future. Les structures politiques, économiques et sociales existantes ne sont pas considérées comme des acquis, et ne sont pas extrapolées à la future, mais elles sont considérées de façon explicites. Des nouvelles possibilités sont explorées en combinant les possibilités techniques avec des désires politiques ou sociales explicites. Des études exploratoires ne donnent pas des schémas directeurs pour arriver aux nouvelles situations. Elles présentent seulement des vues finales statiques. Réaliser des possibilités techniques et changer des structures politiques ou sociales est souvent une question de volonté politique et des mesures appropriées. Il va donc sans dire que de telles études ont besoin d'être suivies pour répondre aux questions, à savoir, comment les vues finales peuvent être réalisées et quels sont les instruments politiques appropriés.

Des études AUT exploratoires peuvent être exécutées pour des raisons diverses. Comme a été dit, l'objectif final est d'opérationnaliser des options d'un développement durable. Plus concret, les raisons peuvent beaucoup varier. La réclamation d'un nouveau territoire en peut être une, la définition des priorités dans la recherche une autre. Il peut y avoir des problèmes dans la production agricole, que ce soit une crise d'aliment (dans quelques pays en voie de développement)

ou une surproduction (la Communauté Européenne). Des problèmes socio-économiques concernant l'emploi agricole ou le revenu paysan peut jouer un rôle. Des questions environnementales et la conservation de la nature ou du paysage peuvent aussi être des motivations pour de telles études exploratoires.

Dans ce chapitre la méthodologie générale des études exploratoire d'utilisation des ressources naturelles est introduite. Après l'introduction une revue historique de la littérature y concernant est donnée qui s'occupe notamment des raisons pour exécuter de telles études. Finalement, une description élaborée est donnée des raisons pour l'exécution des deux études exploratoires qui sont utilisés comme études de cas dans la suite du cours.

2.2. Méthodologie générale

La Figure 2.1 met en lumière les pièces maîtresses de la méthodologie pour des études AUT exploratoires. La technique centrale utilisé dans la méthodologie est la Programmation Linéaire Interactive à Buts Multiples (PLIBM). PLIBM est une technique de programmation linéaire avec plusieurs objectifs au lieu d'un seul. Dans chaque séquence d'un modèle PLIBM, un seul objectif est optimisé, les autres objectifs sont inclus en tant que restriction. Des limites supérieures ou inférieures peuvent être imposés sur ces « restrictions-objectifs ». Pour des différentes vues politiques des scénarios pour l'utilisation des ressources naturelles peuvent être générés à travers l'optimisation et l'imposition des limites sur les objectifs les plus importants. Le [chapitre 3](#) traite les principes et l'arrière plan de la programmation linéaire et la méthode PLIBM.

Le modèle PLIBM est nourri avec d'information de plusieurs sources. D'abord il y a les relations intrants-extrants dans la production agricole basées sur l'évaluation de terre. Les tableaux intrants-extrants représentent la quantification des différentes activités agricoles sur des unités de terre spécifiques. Ils nous informent quels sont les intrants exigés pour produire une production donnée sur une unité de terre avec tel climat et avec de tels caractéristiques pédologiques. Différents principes d'écologie de production sont utilisés pour la quantification systématique et scientifique des relations intrants-extrants.

Deuxièmement, des restrictions techniques ou fixes sont formulées qui représentent d'information sur les différentes ressources, comme la surface de terre, l'eau, et nutriments (fumier). Ils peuvent aussi être utilisés pour la quantification des restrictions normatives comme la consommation et la commercialisation des produits agricoles dans la zone considérée.

Finalement, un ensemble de fonctions objectifs est distillé des vues politiques prépondérantes qui peuvent être distingués dans la société du système sous considération. Normalement les objectifs concernent les aspects écologiques, agricoles, économiques et sociales de la durabilité.

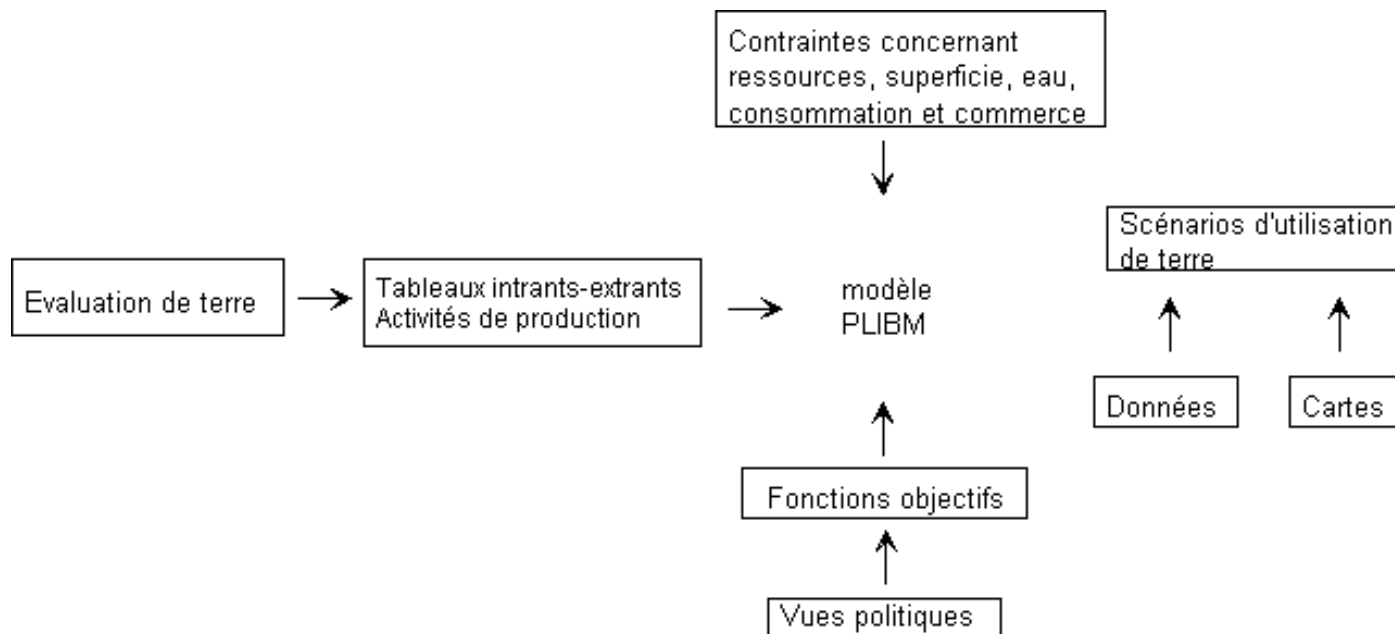


Figure 2.1 Méthodologie générale pour des études exploratoires d'utilisation de terre.

Avec ces trois pièces maîtresses le modèle PLIBM peut être construit. Des scénarios concernant l'utilisation des ressources naturelles peuvent être générés à l'aide du modèle PLIBM pour chacune des vues politiques de la société du système, en choisissant une fonction objectif et en imposant des limites sur les objectifs qui correspondent à ces vues politiques. Les résultats des scénarios incluent les valeurs des fonctions objectifs et l'allocation optimale des terres et d'autres ressources. Les décideurs politiques peuvent alors voir quels sont les effets de leurs priorités sur l'utilisation de terre et sa distribution dans le système.

2.3. Exemples de quelques applications de la méthodologie pour des études exploratoires d'utilisation des ressources naturelles

La méthodologie pour des études exploratoires d'utilisation des ressources naturelles présentée dans le cours est assez récente. Raison pour quoi il n'y a pas encore un grand nombre d'études qui l'ont appliquée. Les exemples diffèrent entre eux dans l'horizon temporel : des uns sont plus exploratoires et sont orientés à un plus long terme que d'autres.

La méthodologie est basée sur le travail présenté par Veeneklaas (1990), dans lequel les analyses techniques et économiques sont jointes. Un modèle intransportable simple avec des relations techniques fut construit. Des relations de comportement ou normatives, qui étaient mal comprises, étaient représentées comme des restrictions. La méthodologie utilise une technique de la recherche opérationnelle, la PLIBM, qui consiste d'une procédure itérative qui donne la possibilité de traiter un problème avec plusieurs objectifs. Cette procédure fut utilisée par Nijkamp & Spronk (1980) et Spronk & Veeneklaas (1983). Le Conseil Scientifique néerlandais pour la Politique Gouvernementale (CSPG) l'a également utilisée (WRR, 1987) dans son étude qui visait d'analyser la future économique des Pays-Bas en tenant compte des questions environnementales.

Pour des problèmes typiquement agricoles ou qui concernent l'utilisation des ressources naturelles plusieurs études ont été exécutées au niveau régional. De Wit *et al.* (1988) présente une étude de cas pour la zone semi-aride de la Base Méditerranéenne du désert Négev en Israël, qui est une région agro-pastorale. Les activités agricoles de cette région consistent de l'élevage des ovins et la culture sèche. L'approche a résulté en options qui reflètent les différents points de vue

politiques pour cette région. Trois points de vue furent distingués provenant de trois groupes sociaux : les traditionalistes, l'agence des nouveaux colons et les nouveaux colons eux-mêmes. Les groupes avaient des opinions bien différentes concernant l'importance des différents sujets : l'aide de développement, la surface des terres sous des systèmes extensifs, l'importation des concentrés pour le bétail, l'emploi, le nombre de colons dans la région et la consommation désirée. Les différentes attitudes vis-à-vis de ces objectifs ont un effet sur l'utilisation des ressources et le choix des races ovines (tableau 2.1).

La première application vraiment agricole est celle du projet Mariut (Ayyad & Van Keulen, 1987). Ce projet visait à estimer les potentiels des différents systèmes agricoles pour ensuite faire une planification pour la zone côtière du Nord-Ouest d'Égypte. Les activités agricoles principales distinguées dans la zone furent la production des fruits (olives et figes), de l'orge, et de la viande des ovins et des caprins. Un nombre de systèmes agricoles fut formulés et leur faisabilité économique fut examinée ainsi que leur effet sur l'état des ressources naturelles. Les résultats visaient à aider les planificateurs d'introduire ou de promouvoir ces systèmes.

Tableau 2.1 Sommaire des résultats du modèle PLIBM pour trois vues politiques, dans l'étude de cas pour une région Méditerranéenne agro-pastorale. Source : De Wit et al., (1988).

	traditionalistes	settlement	agence des settlers	unité
limites sur les buts				
aide de développement	= 0	0	0	\$/an
système extensif	≥ 600	75	75	10 ³ ha
concentrés Importé	= 0	libre	libre	kg
main d'oeuvre embauché	≤ libre	200	libre	p. an
résultats pour objectifs				
emploi	13.000	15.000	10.600	p. an
settlers	11.740	14.800	6000	p. an
croissance linéaire	43	74	0	p. an/an
main d'oeuvre embauché	1260	200	4600	p. an
revenu consommif	121	196	169	10 ⁶ \$
revenu Consommif /settler	11	14	28	10 ³ \$/an
quelques résultats concernant l'utilisation de terre				
utilisation d'engrais azotés	1600	650	608	10 ³ kg
utilisation d'engrais phosphatés	243	866	643	10 ³ kg
superficie blé/jachère	0	0	0	ha
superficie blé/blé	8400	3700	100	ha
superficie blé/légume	851	15.100	16.900	ha
superficie blé total	9251	18.800	17.000	ha
superficie systèmes extensifs	60	12	8	10 ³ ha

nombre d'ovins des races différentes				
systèmes Avunculaire	0	0	0	eq. oie
systèmes Awassi améliorés	122.300	42.700	35.300	eq. oie
systèmes Merino	15.100	75.300	70.500	eq. oie
systèmes de croisement Finn	10	27.200	27.100	eq. oie
nombre d'ovins total	137.410	145.200	132.900	eq. oie

Le CSPG a exécuté une étude (WRR, 1992 ; Rabbinge & Van Latesteijn, 1992) pour l'utilisation future de la terre dans la Communauté Européenne. Leur étude met en lumière les conflits qui apparaissent dans une situation de croissance de productivité, de saturation des marchés, des grandes différences en productivité entre les différents pays de la Communauté, et une inquiétude croissante pour l'emploi régional, l'environnement, la nature et le paysage. Cette étude sert aussi dans le cours comme étude de cas. La section 2.5 de ce chapitre discutera l'arrière-plan et la motivation de cette étude.

Au Costa Rica une étude plus ou moins exploratoire, l'étude USTED (Alfaro *et al.*, 1994) est exécutée pour la Zone Atlantique. Des problèmes avec la commercialisation des produits agricoles et l'inquiétude croissante concernant la perte de la bio-diversité, l'exploitation durable des ressources naturelles et la spéculation fréquente avec la terre furent des arguments pour l'Université Agricole de Wageningen de démarrer une telle étude dans la Zone Atlantique.

Les principes de la méthodologie sont aussi utilisés dans des études au niveau de l'unité de production agricole. Schans (1991) a exécuté une étude pour l'optimisation des systèmes de production culturaux intégrant des objectifs économiques et écologiques. Des systèmes de production aux « Flevopolders » aux Pays-Bas ont été utilisés comme étude de cas. De pareilles études ont été exécutées pour des systèmes de production de bétail laitier (Van de Ven, 1994) et des exploitations de bulbiculture dans la province de « Noord-Holland ». Des nouveaux projets de recherche ont démarré en 1994 pour examiner les possibilités des systèmes agraires mixtes (culture et élevage laitier) aux Pays-Bas, aux niveaux d'exploitation aussi bien qu'au niveau régional.

Stroosnijder & Van Rheenen (1993) ont appliqué la méthodologie pour des petites exploitations mixtes au Java de l'Est, en tenant compte des aspects de sécurité alimentaire, de l'environnement et du bien-être des paysans. Les résultats de cette étude sont publiés par Van Rheenen (1995).

2.4. Arrière-plan et motifs de l'étude du projet PSS au Mali

2.4.1. Généralités sur l'économie du Mali

Les principaux traits de l'économie malienne répondent aux caractéristiques essentielles des pays en voie de développement c'est-à-dire (tableau 2.2).

Tableau 2.2 Le Produit Intérieur Brut (1990), sa répartition et quelques autres caractéristiques de l'économie du Mali (exprimées en milliards F cfa)

			répartition du PIB	%
produit intérieur brut	666	secteur primaire		45,6
taux de croissance du PIB en volume (%)	1,0	agriculture vivrière		13,1

PIB per capita (milliers F cfa)	82,4	agriculture industrielle	3,4
		élevage	22,9
importations	168	pêche	0,9
dont : produits alimentaires	19	sylviculture	5,2
machines et véhicules	60		
produits pétroliers	15	secteur secondaire	12,8
exportations	94	industrie moderne	6,5
dont : coton	44	mines	1,5
bétail	25	artisanat	1,3
l'or et diamant	13	bâtiments et travaux p.	3,6
taux de couverture (exp./imp.) (%)	56		
		secteur tertiaire	37,0
solde balance commerciale (exp. - imp.)	-74	transports	4,7
solde balance biens et services	-96	commerce	17,9
solde balance courante	-34	services non marchands	6,2
solde global des paiements	20	autres services	8,2
budget:			
- recettes	250	taxe à l'importation	4,6
- dépenses	261		
- déficit	11	total	100
dette publique			
- encours	1046		
- services	19		
- ratio service/exportations (%)	20		

Source: DNSI, 1992.

- Le Produit Intérieur Brut (PIB) per capita est bas (environ US \$270).
- Le secteur primaire occupe la première place dans la structure du PIB, soit presque 50 % du PIB, dont la quasi-totalité vient de l'agriculture et l'élevage. Celle du secteur tertiaire est environ 37 % du PIB. D'après les données de 1988-91, ce secteur contient la seule branche dont la valeur ajoutée s'accroît systématiquement : le commerce. Cette tendance doit continuer après la libéralisation du marché. La contribution de l'industrie au PIB est encore faible. Elle est concentrée sur le coton fibre, les tissus, le sucre, les boissons non alcoolisées, les cigarettes et l'électricité.
- Les importations sont essentiellement : les machines et véhicules (36 % en 1990) suivis des produits agro-alimentaires et des produits pétroliers.
- Les principales exportations sont : le coton (47 % en 1990), le bétail, l'or et le diamant.
- Le solde de la balance commerciale (Exportation - Importation) est négatif.
- Le budget présente un niveau de déficit assez important.

- Le Mali a une grande dette publique qui surpasse le PIB d'une année. Et bien que le service de la dette représente environ 25 % de la valeur des exportations, cela ne suffit pas du tout pour le diminuer.

Comme beaucoup d'autres pays africains, le Mali se trouve dans une période de transition concernant son environnement économique. Cette transition est caractérisée par la mise en oeuvre de Programmes d'Ajustement Structurel qui se sont traduits par le désengagement de l'Etat et diverses réformes économiques. Les principales mesures prises dans ces programmes concernent la libéralisation progressive du marché des céréales, la réforme de la commercialisation du coton, la limitation des dépenses publiques notamment de celles relatives au personnel et enfin la réforme du secteur des Entreprises Publiques : liquidation, privatisation, réhabilitation.

Pour renforcer l'ajustement structurel le franc CFA a subi une dévaluation en janvier 1994. La dévaluation doit aider le Mali à rendre plus compétitives ses productions de coton, de riz et de sucre, à augmenter le revenu du monde rural et à rétablir les exportations de la viande et du bétail aux pays voisins. En général elle doit stimuler l'entreprise des activités économiques, et ainsi augmenter la production nationale (Banque Mondiale, 1994).

La politique de décentralisation dans laquelle l'Etat malien s'est engagé à donner aux populations plus de responsabilité dans la détermination des politiques de développement et la prise en charge des activités les touchant directement. C'est ainsi qu'existent des Conseils et des Comités Locaux de développement chargés respectivement des orientations et de l'élaboration des programmes, tandis que les associations de villageois et d'opérateurs privés sont responsabilisées dans les opérations d'approvisionnement et de vente qui leur sont laissées avec le désengagement du secteur public. Un autre aspect est le souhait, officiellement exprimé, de l'intégration des femmes au développement.

Concernant les prix des produits agricoles, la restructuration du marché céréalier, de 1987/88 a eu pour conséquence une libéralisation accentuée, ce que veut dire que les prix sont déterminés par l'offre et la demande, et non fixée par l'état. Cette tendance a continué ces dernières années. A l'heure actuelle, seulement le coton est vendu à un prix fixe à la Compagnie Malienne pour le Développement des Textiles (CMDT).

Pour la production du secteur primaire, la terre est un facteur de production très important. En général ce sont les cultivateurs et les éleveurs qui font les décisions en matière de l'utilisation des terres. Cependant légalement la terre et tout ce qu'elle supporte naturellement relèvent d'une appropriation de l'Etat Malien qui peut se désaisir de tout ou partie de ce droit dans des conditions et suivant des procédures déterminées. Les difficultés de l'Etat à imposer ce droit au monde rural ont comme effet un manque d'application et de suivi des procédures telles qu'elles sont consignées dans le Code Foncier et Foncier, méconnu des paysans.

Une des conséquences est le conflit qui existe entre les cultivateurs et les éleveurs (Breman & Traoré, 1987). Les besoins toujours croissants en terres arables ont mené les cultivateurs à agrandir les superficies cultivées. La conséquence en est une diminution des parcours de pâture. Au même temps le nombre de ruminants a augmenté, surtout à cause des achats d'animaux par les cultivateurs. Ainsi les possibilités de production pour les éleveurs traditionnels ont diminué considérablement. A leur tour, les cultivateurs souffrent à cause des dégâts faits dans leurs champs par des animaux qui viennent brouter avant la récolte. Pour résoudre le conflit et pour éviter la surexploitation continue des terres, il est nécessaire de résoudre le problème foncier par la définition et l'enforcement des régulations pour les droits fonciers et l'utilisation des terres.

Agriculture et élevage

Du mil au blé, de la patate aux ignames, de la canne à sucre au dah, de la mangue à la banane tout se conjugue dans la production agricole du Mali. Pour une liste des principales cultures référez au tableau 2.3. Seulement environ 4 % des superficies au Mali sont des terres arables, dont les trois quarts sont actuellement occupées par des cultures (tableau 2.3). Les cultures vivrières occupent 85 % des superficies cultivées du Mali. La part des cultures destinées à une valorisation industrielle est très faible, tant par la superficie qui leur est consacrée que par la masse de revenus qu'elles dégagent (7,6 % de la valeur ajoutée du secteur

primaire).

Tableau 2.3 Liste des principales cultures du Mali

céréales:	tubercules:	légumineuses:	légumes:
mil	patates	poivron et piment	pois de terre
sorgho	igname	tomate	pois de sucre
riz	manioc	gombo	pastèque
maïs	pomme de terre	oignon	
fonio		niébé	
blé			
cultures industrielles:		cultures fruitières:	
canne à sucre	coton	mangue	
arachide	dah fibre	orange	
tabac	karité	mandarine	
thé	dah grains	banane	

Les céréales représentent 90 % des superficies occupées par les cultures vivrières. On observe une prédominance de la culture du mil dans l'occupation des terres cultivées parmi les céréales. Néanmoins à l'exception du blé les autres cultures occupent une place également importante. Cette importance des céréales est aussi cruciale pour l'élevage compte tenu de la grande disponibilité en sous-produits agricoles que cela implique. Concernant l'arachide et le niébé, il y a des quantités non négligeables de fanes, vue le niveau de production de ces deux cultures. L'évolution de prix au Mali pour quelques cultures importantes est donné dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 Potentiel d'occupation des terres au Mali

	superficie
superficie totale du Mali	1.248.574 km ²
superficie de terres cultivables (arables)	5.222.296 ha
superficie totale occupée par les cultures :	3.909.350 ha

Source: Projet PIRL cité par DNSI (1991)

Tableau 2.5 Evolution des prix aux producteurs des différentes cultures agricoles (F cfa kg⁻¹), 1980-90.

années	cultures				
	mil, sorgho	maïs	riz-paddy	arachide	coton (1er choix)
1981	35	35	38	40	55
1982	43	45	50	45	55
1983	45	48	55	55	65
1984	50	50	60	nd	65
1985	50	50	60	nd	75
1986	55	55	70	nd	85
1987	55	55	70	nd	85
1988	50	36	70	68	85
1989	42	33	70	69	85
1990	63	51	78	nd	85
1991	80	56	81	nd	93
1992	47	36	58	nd	93
1993	51	41	nd	101	nd
1994	45	37	nd	nd	nd

(nd: non disponible)

Sources : (DNSI, SIM/PAM, DPAER/IER)

Population, éducation et santé

En 1987 le Mali avait une population de 7,7 million habitants (DNSI, 1991d) sur une superficie totale de 1,2 million km², soit une densité de population de 6 habitants au km². Le taux d'accroissement est de 2,7 % par année (Banque Mondiale, 1994). La population est inégalement répartie entre les 7 régions administratives, car 75 % de la population se trouve concentré sur 25 % du territoire dans les régions de Ségou, Sikasso, Mopti, et Koulikoro et dans la ville de Bamako (voir le tableau 2.6). Les régions du Nord, Gao et Tombouctou, auxquelles s'est récemment ajoutée la région de Kidal, avaient un effectif total inférieur à 900.000 habitants en 1987, alors qu'elles occupent en termes de superficies plus de 60 % du territoire national.

Des données démographiques de 1987, voyez le tableau 2.6, il ressort que la population malienne est essentiellement rurale (78 %). La population sédentaire représente 96 % et la population nomade (4 %). Il y a beaucoup d'ethnies au Mali. On distingue principalement les Bambaras, Malinkés, Sarakolés, Sonrhais, Dogons, Sénoufos, Bobos, Miniankas, Peuhls, Maures et Tamachecks. Les éleveurs nomades sont surtout les Maures et Tamachecks. Les Peuhls pratiquent surtout l'élevage transhumant. Quant aux ethnies Bambara, Malinké, Dogon, Sénoufo, Bobo, Minianka, Sonrhäi, ce sont surtout des agriculteurs traditionnellement. Comme on assiste de plus en plus à une intégration des 2 activités, ils sont souvent appelés agro-éleveurs.

Le tableau 2.6 montre que la population malienne est caractérisée par une forte proportion de jeunes. En effet les jeunes de moins de 15 ans représentent 46 % de la population totale.

Tableau 2.6 Structure de la population du Mali selon différents critères de classification

catégorie socio-démographique	%	région administrative	%	densité
< 8 ans	24	Kayes	13,9	8,9
8-14 ans	22	Koulikoro	15,6	12,5
15-59 ans	48	Sikasso	17,0	18,7
> 60 ans	6	Ségou	17,4	20,7
femmes	51	Mopti	16,6	16,2
hommes	49	Tombouctou	6,0	0,9
urbaine	22	Gao	5,0	1,2
rurale	78	Bamako	8,5	2612
nomade	4			
sédentaire	96			

Source: DNSI (1991d, les tableaux 5a, 7, 13, 15)

La population présente qui équivaut à la population totale moins la population absente peut être répartie en actifs et inactifs. Environ 3 % de la population est absent, c'est à dire, habite ailleurs. La force de travail (ou le potentiel existant en main d'oeuvre) correspond à la population présente active totale, soit la population non handicapée en âge de travail. Elle est estimée à 4,5 million en 1987 (DNSI, 1991e), représentant 61 % de la population présente. La même source indique que seulement 0,8 % de tout ce potentiel disponible n'est pas en occupation économique. La répartition des actifs par branche d'activité est présentée au tableau 2.7. Les données de ce tableau montrent que le secteur primaire occupe la première place dans la distribution des actifs avec 82 % de la population active. Ceci fait ressortir davantage l'importance du secteur primaire pour l'économie du Mali.

Tableau 2.7 Ventilation du nombre d'actifs en occupation économique par branche d'activité (DNSI, 1991e, page 40)

secteur	%
secteur primaire (agriculture, élevage, sylviculture, pêche)	82
secteur secondaire (industrie, mines, artisanat, bâtim. et trav. publics)	6
secteur tertiaire (transport, commerce, service, administration, autres)	12

Les statistiques sur le secteur éducatif malien (tableau 2.8) montrent que les taux de scolarisation et d'alphabétisation sont très bas. Le taux de scolarisation de 24 % pour l'enseignement primaire est même le plus bas dans la région. Dans les autres pays de l'Afrique subsaharienne ce taux est en moyenne de 61 % et varie de presque 30 % (le Niger) à presque 100 % (le Cap Vert). Pendant la dernière décennie le taux de scolarisation de l'enseignement primaire connaît une tendance à la baisse. Pour les filles, le taux de scolarisation est environ la moitié de celui pour les garçons.

Tableau 2.8 Indicateurs de l'état de l'éducation au Mali

taux de scolarisation	%	taux d'alphabétisation	%
enseignement primaire			
- total	24	total	17
- garçons	30	hommes	23
- filles	17	femmes	11
enseignement secondaire	6		
	1		

Le tableau 2.9 résume quelques indicateurs de santé au Mali. La mortalité infantile est très élevée, 161 sur 1000 enfants meurent avant l'âge d'un an. Pour les autres pays de l'Afrique subsaharienne elle est de 104 sur 1000 et pour les pays développés de 8 sur 1000. La mortalité des enfants de 0 à 5 ans, qui est presque 25 %, est due pour plus de 70 % aux maladies qui peuvent être évitées à travers un soin de santé adéquat, comme le paludisme, la rougeole, le tétanos, les infections respiratoires, et la diarrhée. Un autre problème est constitué par la malnutrition, dont souffre presque un sur trois enfants sous l'âge de 5 ans.

Tableau 2.9 Indicateurs de la situation de santé et de nutrition au Mali

espérance de vie à la naissance	48 ans
mortalité infantile (0-12 mois)	161/1000
mortalité maternelle	850/100.000
prévalence de la malnutrition (< 5 ans)	31 %
taux de vaccination des enfants	25 %

2.4.2. Le projet PSS

Le projet PSS est un projet de coopération entre le Mali et les Pays-Bas dont les travaux ont démarré en 1991.

Les principaux objectifs du projet sont :

- contribuer au développement de systèmes de production durables et rentables ;
- renforcer la capacité de recherche locale à travers la formation des chercheurs nationaux.

La zone d'étude est comprise entre les isohyètes de 300 et 900 mm an⁻¹ en Afrique de l'Ouest. Dans cette zone il y a des liens forts entre les deux types de production. La production d'herbes, de feuilles, fruits, et tiges des pâturages, les cultures fourragères, les résidus de récolte et des produits agro-industriels servent comme des aliments pour le bétail, tandis que le fumier et la traction animale sont des sous-produits animaux qui sont utilisées dans l'agriculture. En plus,

l'élevage est un moyen d'épargne souvent employé par les cultivateurs pour assurer l'approvisionnement alimentaire ou pour pouvoir financer des investissements.

Dans la zone soudano-sahélienne les terres cultivées et les pâturages sont caractérisés par des rendements bas, qui sont surtout dus à la basse fertilité de sol ([Penning de Vries & Djitèye, 1982](#) ; Van Keulen & Breman, 1990), à laquelle est ajoutée la grande variabilité de la pluviométrie (Vierich & Stoop, 1990). La pauvreté des sols est aggravée par une forte croissance démographique, qui mène à la surexploitation des terres et à la dégradation des ressources naturelles, ainsi corroborant encore plus les possibilités de production rurales. Sur les terres cultivées les périodes de jachère sont raccourcies, tandis que les quantités de fumure organique et d'engrais chimiques ne sont pas suffisantes pour restaurer la fertilité du sol (Van de Pol, 1992). Les pâturages souffrent de surpâturage, causant l'érosion, la perte d'espèces pérennes et la diminution du nombre d'arbres. L'élevage souffre également d'une basse productivité, le problème clé étant la manque de fourrage de bonne qualité, notamment dans la saison sèche ([Penning de Vries & Djitèye, 1982](#)).

Techniquement, il y a des solutions pour les problèmes suscités. Van Keulen & Breman (1990) montrent qu'une productivité agricole plus élevée peut être atteinte par l'apport d'éléments nutritifs, notamment l'azote et le phosphore, pourvu que le bilan en matière organique ne soit pas déséquilibré. Un apport d'éléments nutritifs augmenterait aussi la durabilité des systèmes de production végétale. Comme la quantité de fumure organique ne suffit pas pour un bilan d'éléments nutritifs équilibré, une augmentation de l'utilisation des engrais chimiques semble être une condition sine qua non pour un développement agricole durable.

En élevage une productivité plus élevée devait passer par une utilisation plus importante des suppléments alimentaires (résidus de récolte, cultures fourragères, produits agro-industriels) tout en diminuant la pression sur les parcours naturels. Cette option nécessiterait donc une production plus élevée des suppléments. Ainsi l'élevage pourrait également profiter de l'apport des éléments nutritifs que ce soit directement, à travers son utilisation pour les cultures fourragères, les banques fourragères et les pâturages améliorées, ou indirectement, à travers son utilisation pour des cultures vivrières et des cultures de rente, ce qui mènerait à une augmentation en quantité et en qualité (teneur en éléments nutritifs plus élevée) de la production de résidus de récolte.

À l'heure actuelle les solutions indiquées ne sont pas appliquées à une grande échelle, surtout à cause des frais impliqués, ce qui met en lumière la nécessité d'analyser non seulement les aspects techniques ou agro-écologiques, mais aussi les aspects économiques. Il s'agit notamment des facteurs qui peuvent stimuler une production agricole plus élevée, comme des prix rémunérateurs des produits principaux, l'accès aux marchés (infrastructure), la disponibilité des intrants et les prix bas des intrants (notamment des engrais chimiques). La recherche systémique du projet a eu comme objectif d'analyser d'une manière intégrée les différentes options techniques (qui varient selon la zone agro-climatologique) et les conditions socio-économiques, en tenant compte de la disponibilité des ressources, les exigences de durabilité, les relations entre l'agriculture et l'élevage et les objectifs de développement de la région. La méthodologie choisie, qui permet une telle analyse, est la programmation linéaire à buts multiples.

Les modèles PSS sont élaborés à trois niveaux :

- au niveau grande région (Zone soudano-sahélienne) ;
- au niveau petite région (Cercle de Koutiala) et
- au niveau ferme (Unité de Production).

2.5. Quatre perspectives pour les zones rurales dans la Communauté Européenne : Arrière-plan et motifs

La Communauté Européenne - Histoire et données statistiques

La Communauté Economique Européenne (CEE) (Union Européenne depuis 1993) est fondée en 1957 à Rome pour encourager une intégration économique

générale de l'Allemagne de l'Ouest, des Pays-Bas, de la Belgique, du Luxembourg, de la France et de l'Italie. Son premier objectif était un marché commun avec une libre circulation des personnes, des marchandises, des services et du capital. En 1968 l'union douanière a vu le jour : les droits de douane entre les six états membre sont graduellement abolis et un tarif commun contre un état non-membre fut fixé. Aussi, en 1968 une stratégie agricole commune démarre. Les buts de cette stratégie étaient déjà formulés dans le traité de Rome en 1957 :

- augmenter la productivité agricole ;
- faire attention à un niveau de vie standard raisonnable pour les populations rurales ;
- stabiliser les marchés ;
- garantir l'approvisionnement en aliments à un prix raisonnable pour les consommateurs.

En 1973 le Royaume Uni, le Danemark et l'Irlande rejoignent la CE, en 1981 la Grèce et en 1986 l'Espagne et le Portugal.

Actuellement, la CE compte 12 états membre avec une superficie de 229 millions d'ha. Les pays les plus grands sont la France et l'Espagne et les pays les plus petits sont le Luxembourg, la Belgique et les Pays-Bas. La CE compte 324 millions d'habitants (4,2 % de la population mondiale) dont la plupart vivent au Royaume Uni, en Allemagne, en France et en Italie (tableau 2.10). Les pays avec les plus hautes densités de population sont les Pays-Bas et la Belgique et les pays avec les plus faibles densités sont l'Irlande, la Grèce et l'Espagne. La croissance démographique se chiffre à un pour mille par an.

Tableau 2.10 Superficie, population, densité démographique et pourcentage emploi dans l'agriculture dans la CE (L'Allemagne de l'Est exclus). Source : Eurostat (1989).

pays	superficie (mil. ha)	population (millions)	densité (pers/km²)	% employé dans agriculture
EC-12	229	324	143	7,6
Danemark	4,3	5,1	119	5,8
Royaume Uni	25	57	233	2,4
Irlande	7,0	3,5	50	15,8
Rép. Féd. de l'Allemagne	25	61	246	4,5
Pays-Bas	3,5	15	368	4,8
Belgique	3,1	10	323	3,2
Luxembourg	0,3	0,4	143	3,9
France	55	56	101	7,2
Italie	31	57	190	9,8
Grèce	14	10	76	26,6
Espagne	52	39	77	14,3
Portugal	9,3	10	111	21,2

Dans la CE il y a 128 millions de places de travail. Il y a de grandes différences d'emploi entre pays dans les différents secteurs économiques, en moyenne 7,6 %

des personnes sont employés dans l'agriculture, 33,2 % dans l'industrie et 59,2 % dans les services. Au Royaume Uni seulement 2,4 % sont employés dans l'agriculture pendant qu'en Grèce 25 % sont employés dans l'agriculture.

La CE se situe entre les 35° et 60° Nord et est entourée par la mer du Nord, l'Océan Atlantique et la Méditerranée. Le climat peut être divisé en quatre catégories :

1. un climat de mer au Nord-Ouest avec des hivers modérés, des étés frais et des précipitations constantes ;
2. un climat continental à l'Est froid avec des hivers froids et secs, et des étés chauds et secs ;
3. un climat méditerranéen dans les régions autour de la Méditerranée avec des hivers modérés humides et des étés chauds et secs ;
4. des zones de montagnes avec leur propre climat ;

Près de 56 % de la superficie totale sont destinés à l'agriculture (129 millions d'ha - tableau 2.11). Ce pourcentage varie selon les pays entre 41 % (Grèce) et 82 % (Irlande). Le pourcentage des prairies varie beaucoup entre pays : 5 % au Danemark et 66 % en Irlande.

Tableau 2.11 Superficie totale, superficie agricole et % de la superficie agricole (%SA) et % des prairies dans la CE (L'Allemagne de l'Est exclus). Source : Eurostat (1989).

pays	superficie 10⁶ ha	superficie agricole 10⁶ ha	% SA	% prairies
EC-12	229	129	56	21
Danemark	4,3	2,8	65	5
Royaume Uni	25	18	75	46
Irlande	7,0	5,7	82	66
Rép. Féd. de l'Allemagne	25	12	48	18
Pays-Bas	3,5	2,0	58	33
Belgique	3,1	1,4	46	21
Luxembourg	0,3	0,1	48	27
France	55	31	57	22
Italie	31	18	57	16
Grèce	14	5,7	41	13
Espagne	52	27	52	13
Portugal	9,3	4,5	49	8

Tableau 2.12 La distribution de la production de blé à l'intérieur de la CE (L'Allemagne de l'Est exclus), les rendements actuels de blé et les rendements exprimés en pourcentage du rendement potentiel (RP) ou rendement limité par l'eau (RLE) comme pour le niveau de gestion dans la CE-12. Source : De Koning & Van Diepen (1992).

pays	volume de production (% du total de la CE)	rendement de blé (t ha ⁻¹)	rendement actuel comme % RP	rendement comme % RLE
Danemark	2,6	6,3	67	95
Royaume Uni	16,9	6,8	62	77
Irlande	0,7	3,8	62	69
Rép. Féd. de l'Allemagne	13,4	6,2	60	67
Pays-Bas	1,4	7,4	74	85
Belgique	1,6	6,4	62	72
Luxembourg	0,0	4,3	40	53
France	39,8	5,9	54	67
Portugal	0,5	1,6	12	24
Espagne	7,6	2,5	26	60
Italie	12,5	3,8	29	37
Grèce	3,0	2,5	31	38

Le tableau 2.12 donne quelques informations sur la production actuelle et potentielle de blé dans les différents pays. Les productions sont élevées dans les Etats du Nord (Pays-Bas, Royaume Uni, Danemark, Belgique et Allemagne) et bas au Sud (Portugal, Espagne, Grèce et Italie). La production moyenne actuelle de blé est de 28 t ha⁻¹. Entre les pays individuels la pomme de terre varie entre 9,0 t ha⁻¹ au Portugal et 43 t ha⁻¹ aux Pays-Bas.

Tableau 2.13 La production et le pourcentage d'autosuffisance de quelques produits agricoles dans la CE-12 (Allemagne de l'Est exclus). Source : Eurostat (1990).

produits	production (mil. t)	autosuffisance (%)
blé	72	124
orge	47	118
maïs graine	26	96
total céréales	154	114
pomme de terre	42	103
sucre	13	136
vin	17	104
légumes	45	106

lait	113	102 (fromage) 115 (beurre)
viande	31	102
oeufs	5	102

Le tableau 2.13 montre la production des principaux produits agricoles. Pour plusieurs produits l'autosuffisance est assurée à plus de 100 % et c'est l'une des raisons pour commencer une étude : Quatre perspectives pour les zones rurales dans la CE.

Arrière-plan de l'étude sur la CE

En termes généraux la stratégie agricole commune de la CE fut un succès : plusieurs buts ont été atteints. Cependant, beaucoup de problèmes restent à résoudre. Présentement la CE peut être caractérisée comme suit :

- a. Grâce à une croissance de la productivité dans la CE une situation d'autosuffisance a été atteinte pour plusieurs produits. (tableau 2.13).
- b. Après que l'autosuffisance soit acquise la productivité a continué à augmenter. Ce qui a conduit à une surproduction qui a eu des conséquences budgétaires majeures. Le système de prix garanti pour plusieurs produits exige une augmentation la quantité d'argent à apporter par les payeurs de taxe européens aux finances.
- c. Au même moment l'intérêt pour d'autres buts a augmenté. L'environnement, l'emploi et le revenu des paysans sont aujourd'hui très liés au développement agricole. La surutilisation considérable des pesticides et des engrais liée à leur bas prix a créé d'énormes problèmes environnementaux dans certaines parties de la CE.
- d. Il y a une tension croissante entre la CE et le marché mondial notamment les Etats Unis. Dans les négociations GATT la stratégie de prix de produits agricoles dans la CE fut fortement discutée.

Les progrès dans la productivité montrent une ferme croissance partout dans le monde. Dans la figure 2.2 la croissance de la production par hectare du blé est donnée. Le Royaume Uni et les Etats Unis montrent une croissance continue de la productivité surtout

après la deuxième guerre mondiale. Bien sûr, ces progrès ne vont pas continuer éternellement quoique jusqu'à nos jours il n'y ait pas eu de stagnation. Quand et à quel niveau la maximisation doit atteindre n'est chose claire. A raison de ces croissances de productivité il semble possible de garantir la sécurité alimentaire dans la CE avec seulement un nombre relativement petit de paysans avec une superficie relativement petite. Beaucoup d'espace et de force de travail pourrait être utilisé pour d'autres buts, comme la conservation de la nature et la récréation.

Les études du CSPG visaient à définir les limites de cette croissance de la productivité. A la fin ces limites vont permettre de définir les possibilités pour l'agriculture de la communauté.

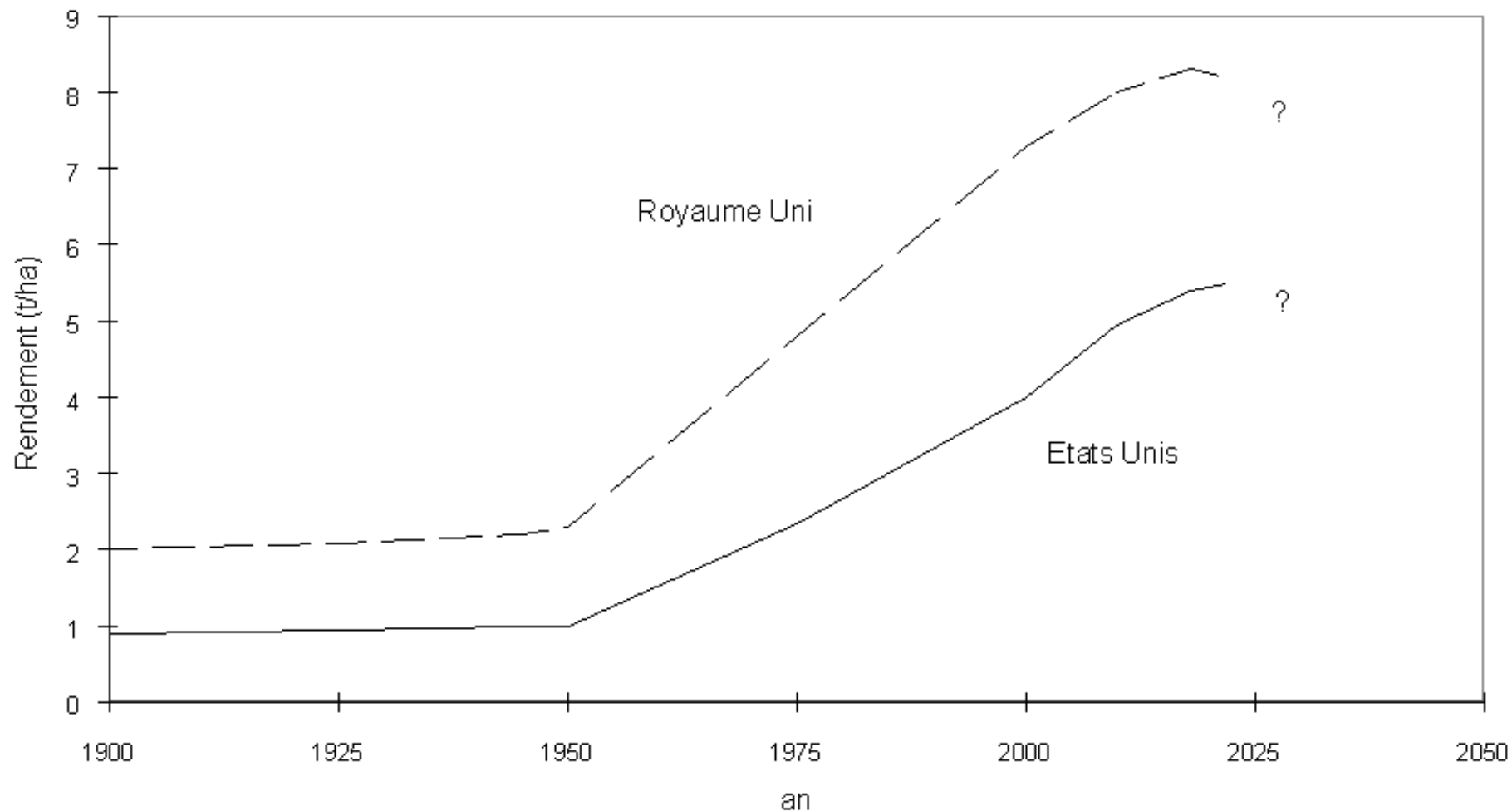


Figure 2.2 Le développement de la productivité de la terre pour le blé au Royaume Uni et aux Etats-Unis. Source : Rabbinge and Van Latensteijn, 1992.

Les limites sont de trois ordres :

1. Limites techniques : Il y a un rendement maximum bien défini pour chaque culture, étant données les propriétés de la culture et les conditions climatiques. Ceci nous dit combien de produits utiles peuvent être produits quand les plantes se développent dans des conditions optimales.
2. Limites de la demande : Maintenant que la croissance de la population dans la CE a presque atteint son immobilisme la consommation ne va plus augmenter.
3. Limites fixées par les objectifs politiques : buts socio-économiques dans le domaine de la conservation de la nature, la récréation et autres.

2.6. Exercices

1. Pourquoi des études exploratoires d'utilisation de la ressource terre sont-elles nécessaires ? Faites un résumé sommaire de ces études et présentez-le en groupe.

2. Sur la base des informations que vous avez reçues concernant l'étude Européenne et l'étude du projet PSS indiquez sur quels plans elles sont similaires et sur quels plans elles sont différentes.
3. Expliquez la principale différence entre des études exploratoires d'utilisation de la terre et des études prédictives d'utilisation de la terre.

3. Programmation Linéaire et Analyse à Critères Multiples

3.1. Introduction

La méthodologie des études AUT utilise des techniques de la recherche opérationnelle pour choisir parmi plusieurs alternatives la meilleure. La principale technique utilisée est la Programmation Linéaire Itérative à Buts Multiples (PLIBM), une technique de la Programmation Linéaire.

Il n'est pas nécessaire de connaître ou de comprendre tous les contours de cette technique (programmation linéaire), une brève introduction de la théorie et des principes est cependant indispensable. Ceux qui veulent approfondir sur les techniques de recherche opérationnelle peuvent consulter d'autres livres.

Avant d'aborder les techniques d'optimisation à critères multiples et la Programmation Linéaire Itérative à Buts Multiples en particulier (3.3) on commencera par étudier la Programmation Linéaire (3.2). La seule différence essentielle entre les deux techniques est qu'en programmation linéaire (PL) un seul objectif (par exemple le revenu ou le nombre d'hectare) peut être optimisé tandis qu'avec la Programmation Linéaire Itérative à Buts Multiples (PLIBM) plusieurs objectifs peuvent être optimisés.

Dans ce cours les théories et les principes de la Programmation Linéaire seront traités à travers un exemple (3.2.1).

Le problème sera résolu de trois manières :

- Graphiquement,
- Algébriquement,
- Par ordinateur (LP88/XPRESS)

La dernière partie de ce chapitre introduit le LP88 et XPRESS qui sont utilisés dans ce cours (3.4).

3.2. Programmation Linéaire (PL)

3.2.1. Exemple

Un paysan espagnol qui n'a pas la possibilité d'irriguer, veut atteindre (obtenir) le maximum de la production de matière sèche (récolte) avec deux cultures : le blé et la pomme de terre.

Un hectare de blé donne un rendement de 2 t de matière sèche (le coefficient dans la fonction objectif est 2) et un hectare de pomme de terre donne un rendement de 5 t (le coefficient dans la fonction objectif est 5).

Le paysan a trois contraintes :

- 1 Il dispose seulement de 6 ha de terres cultivables,
- 2 Les réglementations MacSharry lui interdisent de cultiver plus de 4 ha de blé.
- 3 Dans une certaine parcelle, on ne peut cultiver la pomme de terre qu'une fois tous les deux ans.

Le nombre d'hectares de blé et de pomme de terre ne peut pas être négatif.

La formulation mathématique de ce problème est donnée dans le schéma 1.

Schéma 1. Un exemple d'un problème PL.

$$\text{maximiser } \{ w = 2x_1 + 5x_2 \} \tag{1}$$

soumis à

$$x_1 + x_2 \leq 6 \text{ (contrainte de superficie total)} \tag{2}$$

$$x_1 \leq 4 \text{ (contrainte de marché de blé)} \tag{3}$$

$$x_2 \leq 3 \text{ (contrainte de superficie de pomme de terre)} \tag{4}$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \text{ (condition de non négativité)} \tag{5}$$

ou x_1 = nombre d'hectares sous blé (ha)

x_2 = nombre d'hectares sous pomme de terre (ha)

3.2.2. Variables de décision, contraintes et fonction objectif

Un problème PL consiste en :

- variables de décision ou activités (x_1 : superficie sous blé et x_2 : superficie sous pomme de terre) dans le système ;
- contraintes (Relation 2-5) : ils déterminent les combinaisons admissibles des variables de décision ;
- fonction objectif (Equation 1) : cette fonction décrit le but de l'optimisation et la mesure dans laquelle une combinaison de variables de décision est « bonne »

3.2.3. Formulation

Le schéma 2 montre la forme algébrique de problème PL. Ceci est la forme canonique d'un problème PL. La matrice A est la matrice des coefficients du problème PL. Cette matrice a la dimension : m (lignes = contraintes) x n (colonnes = activités).

Exemple : Le schéma 2 montre la forme canonique de notre problème PL. La matrice doit avoir la dimension 3 x 2 :

$$A: \begin{matrix} 1 & 1 & \underline{b}: 6 \\ 1 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 3 \end{matrix}$$

Schéma 2. La forme algébrique générale d'un problème PL, la forme canonique.

maximiser $\{w = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n\}$

soumis à :

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$$

ou en notation vectorielle et matricielle :

maximiser $\{w = c'x\}$

soumis à :

$$Ax \leq b \text{ (A est une matrice de dimension (m x n))}$$

$$x \geq 0$$

$$\underline{c}' = (c_1, c_2, \dots, c_n)$$

$\underline{x} =$	x_1	$\underline{b} =$	b_1
	x_2		b_2
			b_m
	x_n		
A:	a_{11}	a_{12}	a_{1n}
	a_{21}	a_{22}	a_{2n}
	a_{m1}	a_{m2}	a_{mn}

3.2.4. Transformations

A côté de la forme canonique du problème PL il y a également la forme standard (Schéma 3).

Dans cette formulation les inéquations $Ax \leq b$ sont remplacées par les équations $Ax = b$, en introduisant des « variables d'écart » ou « variables de soudure » (anglais : slack variables).

Schéma 3. La forme standard d'un problème PL.

maximiser $\{w = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n\}$

soumis à

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + y_1 = b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + y_2 = b_2$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + y_m = b_m$$

ou en notation vectorielle et matricielle :

$$\max \{w = \underline{c}'\underline{x}\}$$

soumis à :

$$A\underline{x} = \underline{b} \text{ (A est une matrice de dimension (m x n).)}$$

$$\underline{x} \geq 0$$

$$\underline{c}' = (c_1, c_2, \dots, c_n)$$

$\underline{x} =$	x_1	$\underline{b} =$	b_1	A :	a_{11}	a_{12}	..	a_{1n}	1	0	..	0
	x_2		b_2		a_{21}	a_{22}	..	a_{2n}	0	1	..	0
			b_m						0	0	..	0
	x_n								0	0	..	0
	y_1				a_{m1}	a_{m2}	..	a_{mn}	0	0	..	1
	y_m											

L'inéquation $[Sigma] a_{ij}x_j \leq b_i$ est équivalente à l'équation $[Sigma] a_{ij}x_j + y_i = b_i (y_i \geq 0)$, dans laquelle y_i est une variable d'écart.

Exemple :

Notre exemple peut-être reformulé en forme standard en ajoutant les variables y_1, y_2 et y_3 :

$$\max \{w = 2x_1 + 5x_2 + 0y_1 + 0y_2 + 0y_3\}$$

soumis à :

$$x_1 + x_2 + y_1 = 6$$

$$x_1 + y_2 = 4$$

$$x_2 + y_3 = 3$$

$$x_1, x_2, y_1, y_2 \text{ e } y_3 \geq 0$$

Il y a un nombre de transformations à travers lesquelles n'importe quel problème PL peut-être reformulé dans sa forme standard ou canonique.

1) $\max \{c'x\}$ est équivalent à $\max \{c'x + k\}$ et vice versa ;

2) $\max \{c'x\}$ est équivalent à $\max \{kc'x\}$ ($k > 0$) et vice versa ;

3) $\max \{c'x\}$ est équivalent à $\min \{-c'x\}$ et vice versa ;

4) Une variable de décision x_j ($x_j \leq 0$) peut-être remplacée par $x_j^* = -x_j$ ($x_j^* \geq 0$) ;

5) Une variable x_j qui peut être soit négative soit positive peut être remplacée par $x_j = x_j^+ - x_j^-$, ou $x_j^+ = \max \{x_j, 0\}$ et $x_j^- = \max \{-x_j, 0\}$, so $x_j^+ \geq 0$ et $x_j^- \geq 0$;

6) l'inéquation $[\Sigma] a_{ij}x_j \leq b_i$ peut-être remplacée par : $[\Sigma] a_{ij}x_j + y_i = b_i$, ou $y_i \geq 0$;

7) l'inéquation $[\Sigma] a_{ij}x_j \geq b_i$ peut-être remplacée par : $[\Sigma] a_{ij}x_j - y_i = b_i$, ou $y_i \geq 0$.

Exemples :

1) $\max \{2x_1 + 5x_2\}$ est équivalent à $\max \{2x_1 + 5x_2 + 100\}$;

2) $\max \{2x_1 + 5x_2\}$ est équivalent à $\max \{2000x_1 + 5000x_2\}$;

3) $\max \{2x_1 + 5x_2\}$ est équivalent à $\min \{-2x_1 - 5x_2\}$;

4) $\{x_1 - x_2\}$ ($x_2 \leq 0$) est équivalent à $\{x_1 + x_2^*\}$ ($x_2^* = -x_2$; $x_2^* \geq 0$) ;

5) Bénéfice net = Gain - Perte (Gain et Perte sont des variables non-négatifs ; le bénéfice net peut être soit positif, soit négatif)

6) l'inéquation $x_1 \leq 4$ peut-être remplacée par $x_1 + y_1 = 4$, ou $y_1 \geq 0$;

7) l'inéquation $x_2 \geq 8$ peut-être remplacée par $x_2 - y_2 = 8$, ou $y_2 \geq 0$.

3.2.5. Suppositions et restrictions

Il y a certaines suppositions et restrictions qui sont à la base même de la Programmation Linéaire :

1) La fonction objectif et les restrictions doivent être linéaires dans les variables de décision ; les fonctions non-linéaires peuvent être divisées (éclatées) en petites parties linéaires ;

2) Tous les paramètres (coefficients) sont supposés d'être connus et fixes ;

3) Les variables sont supposées des réels (continus) ; il est possible d'inclure des nombres entiers (programmation mixte en entier) ce qui exige des méthodes spéciales de résolution (par exemple la méthode Branch-and-Bound) qui peut considérablement augmenter le temps de calcul.

3.2.6. Solutions

Les problèmes de Programmation Linéaire peuvent se résoudre graphiquement si le nombre de variables de décision n'excède pas deux. Quand le problème contient plus de deux variables de décision on peut seulement le résoudre algébriquement, par exemple à travers ce qu'on appelle l'Algorithme-Simplex. La méthode graphique est illustrée par notre exemple, figure 3.1.

Graphiquement on comprend qu'il y a quatre classes de solution pour un problème PL (figure 3.2) :

- solution unique : le problème du Schème 1 (figure 3.2a) ;
- solutions alternes : le problème du Schème 1, avec $w=x_1+x_2$ comme fonction objectif (figure 3.2b) ;
- solutions indéterminées : le problème max. $4x_1+x_2$, soumis à $x_1-x_2 \geq -1$, $x_1+x_2 \geq 3$, et $x_1, x_2 \geq 0$ (figure 3.2c) ;
- solution impossible : le problème max. $4x_1+x_2$, soumis à $x_1 \geq 4$, $x_1+x_2 \leq 3$, et $x_1, x_2 \geq 0$ (figure 3.2d).

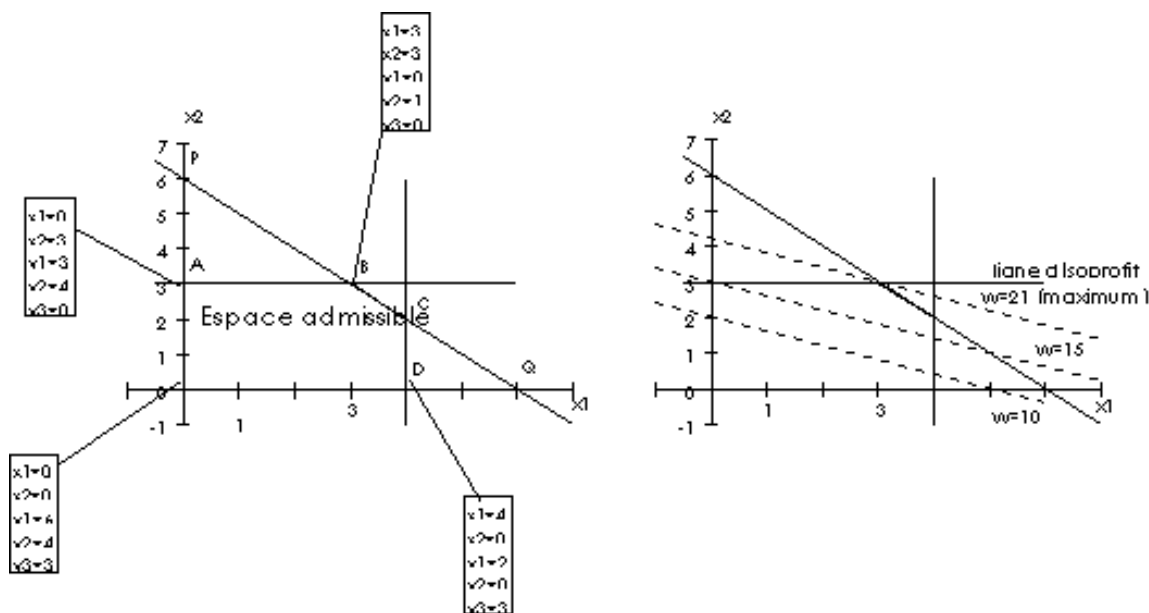
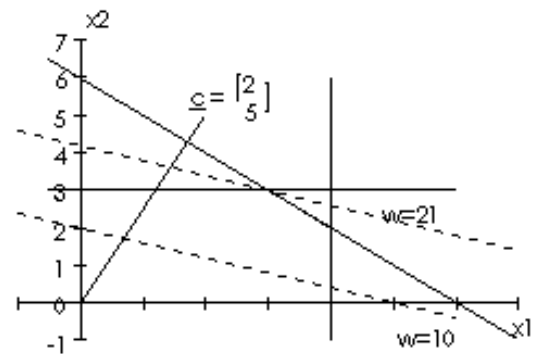
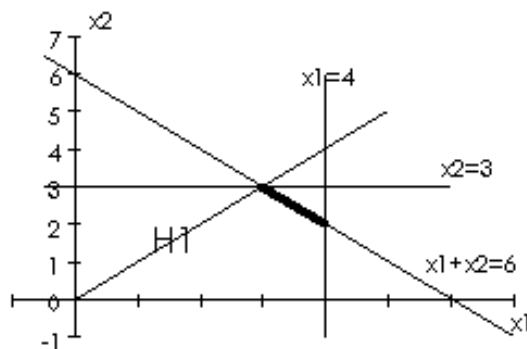


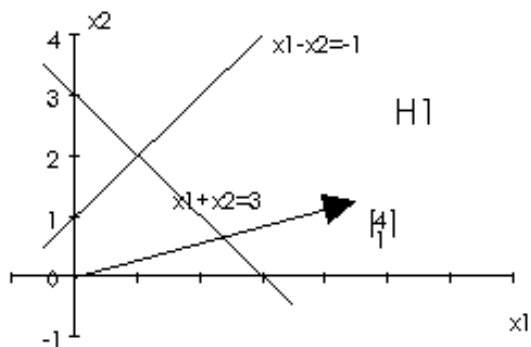
Figure 3.1. Représentation graphique d'un modèle PL. Espace de solution et lignes d'iso-profit. Source : Rossing, 1989.



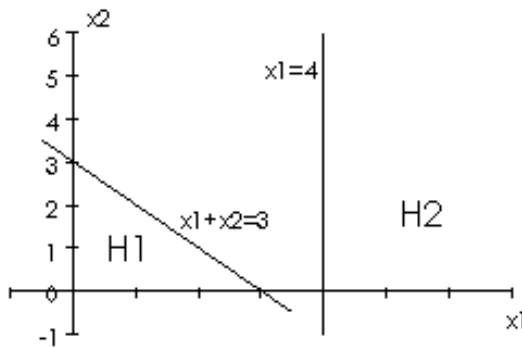
a. solution unique



b. solutions alternatives



c. solution indéterminée



d. solution impossible

Figure 3.2. Les quatre classes de solutions d'un problème PL. Source: Hendriks & Van Beek (1991).

Pour les classes de solution unique et alternatives il est clair que la solution optimale se trouve aux abords de l'espace de solution admissible (solution qui satisfait les contraintes mais qui ne sont pas nécessairement optimales), et une solution unique se trouve à un point angulaire de l'espace admissible.

3.2.7. Algorithme-Simplex

Pour des problèmes de plus de deux variables de décision l'algorithme-simplex est le mieux indiqué pour résoudre des problèmes de Programmation Linéaire. L'ordinateur est indispensable pour résoudre des problèmes pratiques de Programmation Linéaire car ces problèmes contiennent souvent des milliers de variables. L'algorithme-simplex sera illustré par notre exemple avec deux variables de décision.

Le tableau du simplexe : La première chose à faire est de décrire le problème PL dans sa forme standard. Dans notre exemple on peut le faire en ajoutant les variables d'écart y_1 , y_2 et y_3 dans les contraintes (2), (3) et (4) respectivement (comparez les Schémas 1 et 4). Après, le premier tableau est fait (Schéma 4).

Le terme indépendant (en anglais Right Hand Side) de tous les tableaux (les valeurs de b) ne doit pas être négatif. Si le premier tableau contient des termes

indépendants négatifs on doit faire des transformations pour les rendre positifs. Le premier tableau (et tous les autres tableaux) doivent contenir une base unitaire avec la dimension du nombre de lignes. Les variables `appartenant aux vecteurs unitaires' sont appelées variables de base (dans le tableau 1 : y_1, y_2 et y_3). La ligne de bas du tableau représente la fonction objectif formulée de telle façon que la valeur de la fonction w est exprimée en variables hors base. En d'autres termes les activités qui augmentent la valeur de la fonction objectif prennent une valeur négative et les activités qui diminuent la valeur de la fonction objectif prennent un coefficient positif. Les variables de base prennent un coefficient zéro dans la fonction objectif ; la fonction objectif dans notre exemple est exprimée en variable hors base : $w-2x_1-5x_2=0$).

Une solution de base admissible (ou réalisable) d'un problème de Programmation Linéaire est une solution qui a des valeurs non négatives pour toutes les variables de base et des valeurs zéro pour toutes les variables hors bases (de cette façon la solution de base possible peut être lue à partir des termes indépendants du tableau). Cette solution de base admissible coïncide avec un point angulaire de l'espace admissible. Dans les itérations de l'algorithme simplex on se déplace d'un point angulaire de l'espace admissible à l'autre et de cette façon (selon un des propositions la programmation linéaire) d'une solution de base admissible à l'autre.

Ce que l'on trouve la solution de base admissible optimale (si une telle solution existe). On peut démontrer que si une solution admissible optimale existe, une solution de base admissible existe.

L'algorithme-simplex nous indique comment se déplacer d'un point angulaire (solution de base admissible) à l'autre et quand arrêter la procédure, parce qu'on a trouvé la solution optimale. L'algorithme du simplexe sera brièvement expliqué et de façon incomplète à travers notre exemple.

*Le tableau 1 du schéma 4 contient les trois vecteurs unitaires et les trois variables d'écart. Les deux variables de décision sont des variables hors bases et ainsi le zéro est la solution de base possible.(point angulaire O, [figure 3.1](#)). Dans la première itération le meilleur candidat pour rentrer dans la base est une des courantes variables hors bases qui augmentent le plus rapidement la valeur de la fonction objectif (la variable de décision qui a le plus grand coefficient négatif dans la ligne de bas du tableau). La variable de départ est la variable de base qui atteint zéro le premier quand la variable de base qui entre augmente. Dans notre exemple, x_2 est la variable qui contribue le plus par unité à la fonction objectif. Cette variable peut augmenter jusqu'à ce que la contrainte 3 devienne limitatif, i.e. $x_2 = 3$ (Point angulaire A, [figure 3.1](#)) ; y_3 sort de la base. A travers ce qu'on appelle « Opération-Pivot » autour du pivot (marqué par un astérisque, tableau 1, schéma 4), le tableau 2, schéma 4 est généré. La valeur de la fonction objectif a augmenté de zéro à 15 ($3*5$).*

Schéma 4. Le tableau simplexe de notre exemple PL.

$$\max. \{w = 2x_1 + 5x_2\}$$

$$x_1 + x_2 + y_1 = 6$$

$$x_1 + y_2 = 4$$

$$x_2 + y_3 = 3$$

$$x_1, x_2, y_1, y_2, y_3 \geq 0$$

problème PL
forme standard

variables hors bases			variables de base			b
x_1	x_2	y_1	y_2	y_3		
1	1	1	0	0	6	base unitaire
1	0	0	1	0	4	
0	1*	0	0	1	3	
-2	-5	0	0	0	0	

tableau 1

x_1	x_2	y_1	y_2	y_3	b
1*	0	1	0	-1	3
1	0	0	1	0	4
0	1	0	0	1	3
-2	0	0	0	5	15

tableau 2

x_1	x_2	y_1	y_2	y_3	b
1	0	1	0	-1	3
0	0	-1	1	1	1
0	1	0	0	1	3
0	0	2	0	3	21

tableau 3

Schéma 4. Le tableau simplexe de notre exemple PL.

Mathématiquement, le pivot a_{kp} peut se trouver dans la colonne de la nouvelle variable de base x_p , tel que $b_k/a_{kp} = \min \{b_i/a_{ip} \mid \text{pour tout } a_{ip} > 0\}$. Dans l'opération-pivot la ligne du pivot est divisée par a_{kp} , de telle sorte que le pivot prenne la valeur 1. Par la suite la ligne du pivot est additionnée ou soustraite des autres lignes de telle sorte que la colonne du pivot (le coefficient de la ligne de bas incluse) représente un vecteur unitaire. En résumé de 5 étapes :

1. Choix de la colonne pivot ; c'est la colonne avec la plus grande valeur négative dans la ligne de bas.
2. Choix de la ligne pivot : c'est la ligne avec le plus petit quotient résultant de la division de la valeur b et l'élément positif de la colonne pivot.
3. Dériver la nouvelle ligne pivot : On divise chaque élément de la ligne pivot par le pivot.
4. Dériver les autres lignes : On soustrait (ou additionne) un multiple approprié de la ligne pivot de chacune des autres lignes de telle sorte que tous les autres éléments de la colonne-pivot soient zéro.
5. Vérifier si la solution obtenue après l'opération-pivot est optimale ou non : en d'autres termes vérifier si la valeur de la fonction objectif peut augmenter en

augmentant n'importe quelle variable hors base. Ceci peut être fait en vérifiant s'il y a une variable hors base qui a un coefficient négatif dans la ligne de bas du tableau 2, schéma 4. La variable avec le plus grand coefficient négatif est choisie et la variable qui doit sortir de la base est la variable qui devient zéro premier au moment où la variable de base entrant augmente. Dans notre exemple, x_1 est la variable qui, maintenant, augmente le plus la valeur de la fonction objectif.

Cette variable peut augmenter jusqu'à ce que la contrainte 1 devienne limitatif, i.e. $x_1 = 3$ (point angulaire B, figure 3.1) et y_1 sort de la base. A travers l'opération-pivot autour du pivot (marqué par un astérisque, tableau 2, schéma 4) le tableau 3, schéma 4 est généré. La valeur de la fonction objectif devient 21. Maintenant on ne trouve aucune valeur négative dans la ligne de bas du tableau 3, schéma 4 et la fonction objectif ne peut plus augmenter, la solution optimale est ainsi atteinte (obtenue).

3.2.8. Analyse Post-optimum ou analyse de sensibilité

Résoudre un problème PL donne plus de renseignement sur la solution optimale que seulement la valeur de la fonction objectif, les niveaux des variables de décision et les variables d'écart ou surplus dans les contraintes. Une partie intégrante de la solution d'un problème PL est l'analyse de sensibilité. Elle concerne l'étude des changements dans la solution optimale suite à des changements dans le modèle originel.

La notation matricielle d'un problème PL se lit :

$$\text{Max } \{w = \underline{c}'x\}$$

soumis à :

$$\begin{aligned} Ax &\leq \underline{b} \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

Les coefficients a (dans A), b et c de ce problème sont souvent soumis à des variabilités ou incertitudes. Il est important de savoir comment la solution optimale d'un problème PL change si certains de ces coefficients changeaient. Les analyses suivantes donnent des informations à propos de ces changements : le coût d'opportunité et les fourchettes des termes indépendants pour des changements des valeurs de b , les fourchettes des coefficients de la fonction objectif et le « coût réduit » (anglais : reduced cost) pour des changements des valeurs de c . Malheureusement, toutes ces analyses ne concernent que des changements partiels des coefficients ; pas de changements simultanés des plusieurs coefficients.

Les coûts d'opportunité

Dans le tableau de la solution optimale d'un problème PL les coefficients de la ligne de bas dans les colonnes des variables d'écart, appelées « coût d'opportunité », nous disent l'augmentation (ou la diminution dans le cas où le coût d'opportunité est négatif) de la valeur de la fonction objectif quand la contrainte est lâchée d'une unité. Dans notre exemple : seules les contraintes 1 et 3 ont des coûts d'opportunités, la contrainte 2 n'est pas limitatif. Si l'on pouvait augmenter le terme indépendant de la contrainte 1 d'une unité la valeur de la fonction objectif pourrait augmenter de 2 (la solution optimale peut être une unité extra de x_1 : la fonction objectif augmente de 2). Si l'on pouvait augmenter le terme indépendant de la contrainte 3 d'une unité la valeur de la fonction objectif pourrait augmenter de 3 (la solution optimale peut être : une unité extra de x_2 au détriment d'une unité de x_1 : la fonction objectif augmente de $5-2=3$).

Fourchette des termes indépendants

Afin de garder la même solution de base admissible optimale, les changements admis dans les termes indépendants sont déduits du tableau final. Nous allons seulement démontrer graphiquement comment déterminer les changements admis (autorisés) dans les termes indépendants sans changements dans la base optimale (figure 3.3) :

Contrainte 1 : Si le terme indépendant est supérieur à 7, la contrainte 2 au lieu de la contrainte 1 devient limitatif et y_1 entre dans la base en lieu et place de y_2 . Si le terme indépendant est inférieur à 3, y_3 entre dans la base en lieu et place de x_1 .

Contrainte 2 : si le terme indépendant diminue de plus d'une unité, cette contrainte devient limitatif et y_2 sort de la base pour y_1 .

Contrainte 3 : Pour un terme indépendant entre 2 et 6 la base optimale ne change pas. Au-delà de cette fourchette soit y_2 sort de la base pour y_1 , ou x_1 sort de la base pour y_3 .

Fourchette des coefficients de la fonction objectif

Le tableau de la solution optimale donne aussi des informations sur la sensibilité de la solution optimale pour des changements dans les valeurs des coefficients de la fonction objectif. Il n'est pas expliqué comment calculer cette forme de tableau. Il peut être déduit de la figure 3.3 que B reste la solution optimale pour des coefficients de la fonction objectif de x_1 et x_2 sont comprises entre zéro et 5 et entre 2 et l'infini, respectivement. Bien sûr, la valeur de la fonction objectif change.

Coût réduit

Les variables de valeur zéro (variables qui n'apparaissent pas dans la solution optimale). Ce qu'on appelle des coûts réduits. Ces coûts réduits indiquent avec quel montant le coefficient de la fonction objectif d'une variable zéro doit être changé avant cette variable ait une valeur positive dans la solution optimale. Ainsi, le coût réduit donne le changement minimal d'un certain coefficient c d'une variable zéro qui est nécessaire pour rendre cette variable zéro plus intéressante que la présente variable non-zéro. Dans notre exemple toutes les deux variables (x_1 and x_2) sont des variables non-zéro (choisies dans la solution optimale), ainsi les deux variables n'ont pas de coût réduit (cf. exercice 6).

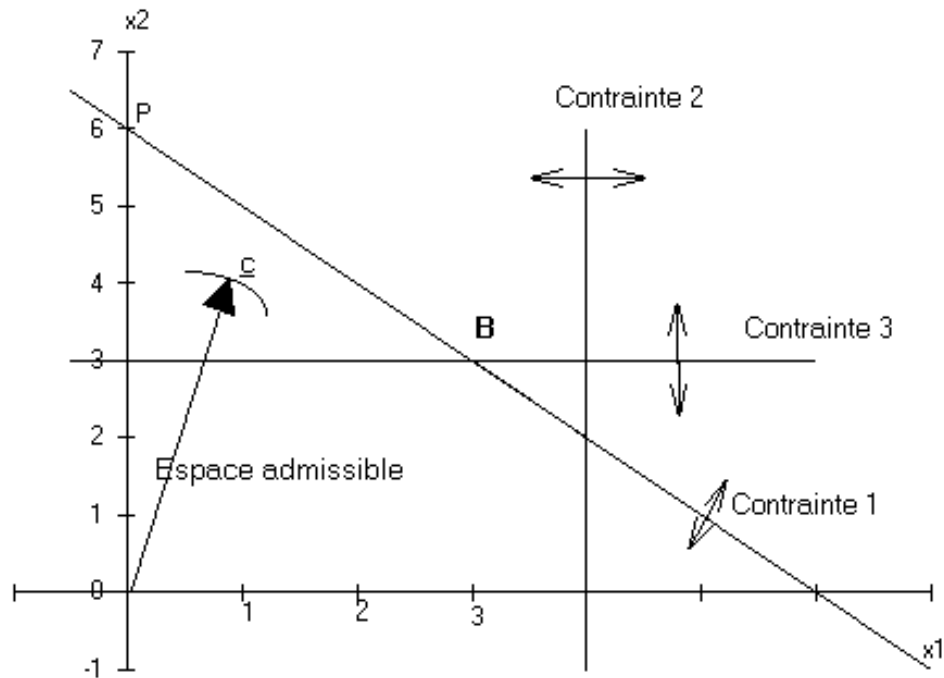


Figure 3.3. Analyse de sensibilité de la solution optimale.

3.2.9. Exemple d'un problème de programmation linéaire dans un champ commun du village de Tagota dans la région de Mara, Tanzanie

Cet exemple est extrait du livre « *Doing Mathematics in a Developing Country* » publié par la Tanzanie Publishing House, p. 63-67 (voir Schweigman (1979)). Cet exemple a été traité par G.C.N. Sibuti, à l'époque étudiant à l'Université de Dar-Es-Salam et originaire du village Tagota. Les données utilisées dans cet exemple sont obtenues à partir de son expérience et des interviews réalisées dans le village.

Tagota est un village Ujuma dans la région Mara en Tanzanie où vivent une centaine de familles. Le maïs est leur principale culture. Pendant la période de croissance du maïs, chaque famille utilise toute sa main-d'oeuvre pour la culture du maïs. Les villageois, bien qu'utilisant la charrue à traction bovine (boeufs de labour), discutent l'opportunité de louer un tracteur ou des désherbants pour le sarclage. Cette étude est consacrée à rechercher si oui ou non il faut louer un tracteur et utiliser des herbicides.

Au lieu de prendre en compte toute la population du village, nous allons dans cette étude nous limiter au cas d'une famille moyenne de 5 personnes. Supposons que chaque famille du village possède en moyenne une charrue. Etudions la situation d'une famille, au lieu de celle du village tout entier, en supposant que toutes les familles cultivent le maïs de la même façon.

Commençons par définir les variables et formuler les contraintes, ensuite nous déterminerons le type d'informations et de données statistiques dont nous avons besoin.

Faut-il louer un tracteur ou pas, faut-il utiliser des herbicides ou pas ; ce ne sont pas là de données quantitatives. Nous voulons savoir combien d'âcres (1 âcre = 0,4 hectare) il faut faire labourer par un tracteur, et pour combien d'âcres faudra t-il acheter des herbicides. Choisissons, pour traiter cet exemple, les variables suivantes :

x1

la superficie sur laquelle : le maïs est cultivé, le tracteur est utilisé pour labourer, le sarclage se fait à la main.

x2

la superficie sur laquelle : le maïs est cultivé, le tracteur est utilisé pour labourer, le sarclage se fait à l'aide des herbicides.

x3

la superficie sur laquelle : le maïs est cultivé, la charrue à boeufs est utilisée pour labourer et le sarclage se fait à la main.

x4

la superficie sur laquelle : le maïs est cultivé, la charrue à boeufs est utilisée pour labourer et le sarclage se fait à l'aide des herbicides.

Remarquer que la superficie totale occupée par le maïs est égale à $x1 + x2 + x3 + x4$. Ici, la « contrainte de terre » n'intervient pas parce qu'il y a suffisamment de terres. Pour formuler la « contrainte de main-d'oeuvre », on doit d'abord savoir quand il faut labourer, planter, désherber et récolter. Ces données sont illustrées par le tableau 3.1

Tableau 3.1. Calendrier des activités agricoles pour le maïs dans le village de Tagota, en Tanzanie.

janvier	sarcler
février	sarcler
mars	
avril	récolter
mai	récolter
juin	
juillet	
août	
septembre	
octobre	labourer & planter
novembre	labourer & planter
décembre	labourer & planter

Labourer et semer d'octobre à novembre:

Un tracteur met 1 heure pour labourer 1 âcre, il faut 15 heures de main-d'oeuvre familiale pour nettoyer, (1) préparer et semer. Remarquer : on laboure deux fois, la première fois on nettoie, la deuxième fois on sème (2)

*La charrue à boeufs a besoin de 3 jours de 4 heures pour (3)
labourer un âcre et de 60 heures de main-d'oeuvre familiale (4)
Remarque : on laboure deux fois (5)*

Sacler de janvier à février:

*Si aucun herbicide n'est utilisé, le sarclage dure 15 jours de mains d'oeuvre de 9 heures = 135 heures de main-d'oeuvre familiale par âcre ; (6)
Si l'herbicide est utilisé, le sarclage n'est pas nécessaire, mais on a besoin de 5 heures pour pulvériser un âcre pendant la période de semis (7)*

Récolter en avril et mai:

La récolte se fait à la main, il faut 30 heures de main-d'oeuvre familiale pour récolter 1 âcre de maïs (8)

A l'aide des données ci-dessus et en tenant compte du fait qu'un mois compte 25 jours de travail, nous pouvons formuler les différentes contraintes de travail comme suit :

La contrainte sur l'utilisation d'un tracteur pour labourer d'octobre à décembre est la suivante :

$$2(x_1 + x_2) \leq 75 * 8 \text{ (9)}$$

*Pour obtenir cette relation, nous avons supposé qu'un tracteur est loué chaque jour ouvrable pour 8 heures de travail et nous avons utilisé les données (1) et (2).
La contrainte sur l'utilisation de la charrue à boeufs d'Octobre à Décembre est la suivante :*

$$24(x_3 + x_4) \leq 75 * 4 \text{ (10)}$$

Pour obtenir cette relation, nous avons utilisé les données (3) et (5) et nous avons supposé que les boeufs ne sont habilités à tirer la charrue que pendant 4 heures par jour.

Les contraintes sur la main-d'oeuvre durant les périodes de semis, de sarclage et de récolte sont :

Pour la période de semis qui dure d'octobre à décembre, on a la contrainte suivante :

$$30(x_1 + x_2) + 120(x_3 + x_4) + 5(x_2 + x_4) \leq 75 * 5 * 9 \text{ (11)}$$

Pour obtenir cette relation, nous avons utilisé les données (1),(2), (4), (5) et (7).

Pour la période de sarclage en janvier et février, on a la contrainte suivante :

$$135(x_1 + x_3) \leq 50 * 5 * 9 \text{ (12)}$$

Pour obtenir cette relation, nous avons utilisé (6) et l'information selon laquelle, on travaille 9 heures par jour.

Pour la période de récolte en avril et mai, on a la contrainte suivante :

$$30(x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \leq 50 * 5 * 9 \quad (13)$$

Pour obtenir cette relation, nous avons utilisé (8).

La contrainte de la demande alimentaire peut s'écrire :

$$900(x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \geq 720 \quad (14)$$

Pour obtenir cette relation, nous avons utilisé les données suivantes : le rendement du maïs est de 900 kg par acre et est indépendant de l'utilisation des tracteurs et des herbicides ; la consommation annuelle du maïs est estimée à 720 kg.

Quant à la fonction objective, plusieurs choix sont possibles :

1. La maximisation de la production totale :

$$\text{max} : 900(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)$$

2. La maximisation du revenu net provenant de la vente du surplus de la production :

$$\text{max} : 0,80 * (900(x_1 + x_2 + x_3 + x_4) - 720) - 100(x_1 + x_2) - 100(x_3 + x_4) \quad (15)$$

Pour obtenir cette fonction, nous avons utilisé les données suivantes : le prix de vente d'un kg maïs est de 0,80 shilling, le coût de location d'un tracteur pour labourer 1 acre est de 50 shilling, le coût des herbicides est 100 shilling par acre. Nous avons pas pris en compte les coûts de l'utilisation de charrue parce qu'ils sont négligeables par rapport aux coûts de location du tracteur.

Considération la fonction objective (15) . En supposant positives les différentes variables du programme linéaire (9) - (15), ce programme peut s'écrire :

$$\text{maximiser} : 620 x_1 + 520 x_2 + 720 x_3 + 620 x_4 - 576$$

sous les contraintes

$$2x_1 + 2x_2 \leq 600$$

$$24x_3 + 24x_4 \leq 300$$

$$30x_1 + 35x_2 + 120x_3 + 125x_4 \leq 3375$$

$$135x_1 + 135x_3 \leq 2250 \quad (16)$$

$$30x_1 + 30x_2 + 30x_3 + 30x_4 \leq 2250$$

$$900x_1 + 900x_2 + 900x_3 + 900x_4 \geq 720$$

$$x_j \geq 0, j = 1,2,3,4$$

La solution de ce programme est la suivante :

$$x_1 = 7,4 ; x_2 = 58,3, x_3 = 9,3 \text{ and } x_4 = 0 \text{ acres}$$

On tire de cette solution les résultats suivants : il faut tout aussi bien louer un tracteur qu'utiliser la charrue à boeufs. Il faut acheter des herbicides sans oublier que, sur certaines parcelles d'une superficie de (7,4 + 9,3) âcres, le sarclage doit se faire à la main. Pendant la période des semailles, la charrue à boeufs n'est pas utilisée à plein temps, 77,8 heures restent inoccupées. Toute la main-d'oeuvre, de sarclage et de récolte. La production du maïs est fortement supérieure à la consommation. Le revenu obtenu est de 41.016 shilling. Au lieu de se contenter de ces chiffres secs, on peut entreprendre des recherches sur d'autres alternatives. Par exemple, que deviennent les revenus si on n'utilise pas de tracteur ? Y a-t-il une grande différence entre les revenus ? Que se passe-t-il si aucun herbicide n'est acheté ? Y a-t-il une grande différence à maximiser les rendements à la place du revenu net ? Quel est le revenu par habitant ?

3.2.10. Logiciels pour résoudre des problèmes PL

Il y a plusieurs logiciels pour résoudre un problème PL. Ces logiciels diffèrent dans la taille des problèmes qu'ils peuvent résoudre, le « hardware » adéquat et l'interface nécessaire des utilisateurs (the users interface). La taille du problème à résoudre dépend du nombre de restrictions, du nombre de variables de décision, du nombre de variables entiers et du nombre de coefficients non-zéro dans la matrice. Ce dernier détermine ce qu'on appelle la densité de la matrice', la fraction des coefficients non-zéro.

Un logiciel PL en général comprend plusieurs parties :

- *Le Générateur GM (GGM). Un Générateur MG est le langage de programmation supérieur spécifiquement convenable à la programmation linéaire. Avec un GGM le modèle PL peut être 'mathématiquement' décrit et fidèlement traduit en formulation mathématique, facilement convertible en langage de machine.*
- *Le Générateur de Matrice (GM). Le Générateur de Matrice transforme les données d'une base de données en Tableau Simplexe à travers la formulation mathématique du problème PL faite avec le Générateur GM. Sans le MG il serait impossible de contrôler, de changer ou de sérier les données. Le résultat d'un Générateur de Matrice est un MPS-fichier (Mathematical Programming System Format-file). Le fichier MPS est un fichier standard dans lequel la matrice est écrite sans équivoque et de façon compact. Dans le fichier on distingue un certain nombre de sections (voir exemple) :*
- *Name (Nom) : Nom du problème.*
- *Rows (Lignes) : type et nom des lignes (y compris la fonction objectif) ;*
- *Columns (Colonnes) : par colonne le nom et les coefficients non-zero sont donnés ;*
- Le nom ou le numéro de la ligne donne la position juste des coefficients ;*
- *RHS, ce que veut dire Right Hand Side (terme indépendant ou le vecteur b) ;*
- *Endata, qui indique le fin du fichier.*

Dans les logiciels les plus récents la fonction du Générateur de Matrice (liant les données au modèle) est exécuté par la routine du Générateur MG.

- *L'optimisateur ou routine du simplexe. L'optimisateur contient l'algorithme du simplexe et habituellement l'analyse post-optimale et les algorithmes pour la programmation en entier.*
- *Le rapporteur. C'est un programme qui traite les sorties de L'optimisateur, de telle sorte que l'utilisateur peut facilement lire et interpréter les résultats.*

Exemple de fichier MPS (Notre problème PL : Cultiver du blé et de la pomme de terre):

NAME EXEMPLE CULTIVER DU BLE ET DE LA POMME DE TERRE

ROWS

N 1 (fonction objectif)

L 2

L 3 (contraintes)

L 4
 COLUMNS
 X1 1 2.0000
 X1 2 1.0000
 X1 3 1.0000 (variable, numéro de ligne, coefficient de c ou a)
 X2 1 5.0000
 X2 2 1.0000
 X2 4 1.0000 RHS
 RHS 2 6.0000 (Termes indépendants ou valeurs de
 RHS 3 4.0000 b, numéro de ligne, coefficient b)
 RHS 4 3.0000
 ENDATA

Tableau 3.2. Exemples de software PL. Source : Hendriks & Van Beek (1991).

name	fournisseur	hardware
MPSX-MIP	IBM	mainframe
SCICONIC	SCICON Ltd.	mainframe and mini
OMP	B&P	mini and PC
XPRESS-MP	Dash Ass.	PC-AT386
LINDO	LINDO Systems	mini and PC
PC-Prog	QMS	PC
GAMS/MINOS	World Bank	mainframe PC

Le tableau 3.2 montre plusieurs exemples de paquets software pour PL. Le QUASI (cas du Mali) a été originalement écrit en SCICONIC. Le cas du « Régions rurales » dans la CE a été originalement écrit en Générateur MG GAMS et le solver LAMPS a été utilisé. L'étude de cas du projet PSS a été écrit en XPRESS-MP.

3.3. Optimisation à critères multiples

Pour optimiser des problèmes ayant un seul objectif, et des contraintes qui sont linéaires dans les variables de décision on peut utiliser la programmation linéaire pour trouver la solution optimale. Cependant dans beaucoup de problèmes d'optimisation (e.g. concernant l'utilisation de la terre) il y a plusieurs objectifs que celui qui tient les enjeux « intéressé » veut satisfaire.. Intéressé cherche un bon compromis entre plusieurs objectifs conflictuels. Dans des situations avec plus d'un objectif il est aussi possible d'utiliser les techniques de la programmation linéaire avec l'algorithme-simplex.

Avant d'aborder les techniques d'optimisation à critères multiples (3.3.4), les différences conceptuelles entre attributs, objectifs, buts et contraintes seront discutées (3.3.1) et l'idée d'efficacité ou une solution optimale Pareto sera introduite (3.3.2) et le concept de « trade offs » sera présenté (3.3.3).

L'approche et le texte de ce paragraphe sont extraits du livre de Romero & Rehman (1989) sur l'Analyse à Critères Multiples pour la prise de décision dans l'agriculture.

3.3.1. Attributs, objectifs, cible et and buts

Intéressé peut établir sa préférence selon plusieurs attributs, par exemple la valeur ajoutée ou le niveau d'emploi (par un jeu d'activités). Les attributs peuvent être mesurés indépendamment à partir des vœux des intéressés et dans beaucoup de cas exprimés dans une fonction mathématique de variables de décision. Objectives impliquent la maximisation ou la minimisation d'un ou plusieurs attributs et reflètent les préférences de l'intéressé, e.g. maximiser la valeur ajoutée ou minimiser le chômage. Une cible est un niveau acceptable d'un attribut. Un but est un attribut avec un certain niveau cible, e.g. l'intéressé veut une valeur ajoutée d'au moins 100.000,=. En général les buts prennent la forme $f(x) \leq / \geq t$ ou $f(x) = t$, où t est un paramètre représentant le niveau désiré ou une valeur cible. Résumé selon Romero & Rehman, « Dans la planification d'un problème au niveau paysan le bénéfice est un attribut ; maximiser le bénéfice est un objectif ; et, atteindre au moins un certain niveau cible est un but. Finalement, un critère est un terme générale contenant les trois concepts précédents. Les critères sont les attributs, les objectifs ou les buts à considérer comme important dans un problème d'optimisation.

Buts et contraintes ont la même structure mathématique et sont exactement les mêmes comme ils sont tous des inéquations ou équations. Une différence entre les deux peut être liée au sens donné aux termes indépendants de l'(in)équation : avec les buts le terme indépendant est une cible désiré par l'intéressé, qui peut être atteint ou non ; sous contraintes, le terme indépendant des contraintes doit être satisfait. Ainsi les buts peuvent être considérés comme des contraintes souples qu'on peut violer sans provoquer des solutions non admissibles. Le montant de la violation peut être mesuré en introduisant des variables de déviation dérivées positives et négatives ou des variables d'écart (voir programmation linéaire). Par exemple, le but relatif à l'obtention d'une valeur ajoutée de 100.000,= par les activités x_1 et x_2 ajoutant 1000,= et 5000,= par unité, respectivement, peut être représenté comme suit.

$$1000x_1 + 5000x_2 + n - p = 100.000$$

Les variables n et p représentent des déviations de l'obtention d'un but de sa valeur cible. Par exemple si l'actuelle valeur ajoutée est seulement 75.000, alors $n = 25.000$; si la valeur ajoutée est 125.000, alors $p = 25.000$ (ainsi, soit n ou p est non-zero). Ainsi, un but peut être exprimé comme suit :

ATTRIBUT + VARIABLES DE DEVIATION = CIBLE

ou en terme mathématique :

$$f(x) + n - p = t$$

3.3.2. L'optimum de Pareto ou solutions efficaces

Romero & Rehman : « Les solutions efficaces ou les optimums de Pareto sont des solutions admissibles telle qu'aucune autre solution admissible peut atteindre ou être plus performant pour tous les critères pris en considération et elles sont strictement meilleures pour au moins un critère. En d'autres termes, la solution optimale de Pareto est une solution admissible pour laquelle une augmentation de la valeur d'un critère peut être atteinte seulement en dégradant la valeur d'au moins un autre critère. »

Exemple :

Un problème avec les trois solutions admissibles suivantes, dont la performance selon les trois attributs est comme suit :

	Marge brute (florins)	Main-d'oeuvre (heures)	Emission (kg N/ha)
Solution 1	80.000	500	100
Solution 2	80.000	600	100
Solution 3	90.000	700	120

L'intéressé veut maximiser la marge brute et minimiser le labour saisonnier et l'émission. Il est clair que la seconde solution n'est pas efficace, parce qu'elle donne la même marge brute et émission, mais exige plus de la main-d'oeuvre saisonnière. Le premier et la troisième solution sont les optimum de Pareto.

Selon Romero & Rehman : « Toutes les techniques d'optimisation à critères multiples visent l'obtention des solutions qui sont efficaces dans le sens de Pareto. Même sans l'approche de la programmation à objectif multiple la première chose à prendre en compte c'est d'obtenir des solutions admissibles efficaces. La région réelle est divisée en deux sous-ensemble disjoints. Le sous-ensemble de solution admissible et non-efficace et le sous ensemble de solutions admissibles et efficaces. Après ça les préférences de l'optimiseur sont introduites pour établir le compromis à l'intérieur de l'ensemble admissible et efficace. »

3.3.3. Le compromis entre critères

Le trade-off entre deux critères (objectifs) veut dire le montant d'un critère qui doit être sacrifié pour obtenir une augmentation d'un autre critère d'une unité., par exemple le trade-off value entre la marge brute et la main-d'oeuvre saisonnière pour les solutions 1 et 3 dans l'exemple précédant était:

$$T_{13} = (90.000-80.000) / (700 - 500) = 50$$

Le trade-off indique que chaque heure de labour saisonnière de moins implique une diminution moyenne de la marge bénéficiaire de | 50. Les valeurs du trade-offs, en plus être un bon indice pour mesurer le coût d'opportunité d'un critère en terme d'un autre critère, joue un rôle clé dans l'analyse des techniques interactives.

A première vue le concept de trade-offs ressemble à celui de coût d'opportunité. Il y a cependant une différence nette. Le trade-off entre deux objectifs (ou entre un objectif et une contrainte) est défini comme le changement dans une fonction objectif suite à un changement particulier d'un autre objectif/contraintes. Il est habituellement calculé en comparant les résultats de deux optimisations ou plus. La linéarité du trade-off dans la limite des valeurs optimums de la fonction objectif (dans l'exemple précédant : entre 90.000-80.000 et 700-500) n'est pas considérée. Les coûts d'opportunité sont définis seulement pour un changement unitaire dans le terme indépendant pour une contrainte ; les coûts d'opportunité sont valables seulement pour ce changement unitaire. On peut les calculer pour chaque optimisation individuelle.

3.3.4. Techniques de prise de décision à critères multiples

Les précédentes définitions et concepts nous permettent de faire une classification grossière de principales approches d'optimisation à critères multiples. L'objectif n'est de comprendre tous le contours de toutes les techniques, mais de donner une vue d'ensemble de reconnaître les différentes techniques quand on lit dans la littérature.

La programmation de but (PB)

Pour chaque objectif un but spécifique est définis, ainsi qu'une variable de déviation positive et une variable de déviation négative. Ces variables indiquent donc la différence entre la cible et la valeur actuellement atteinte. Ainsi on permet en principe de ne pas tout à fait atteindre la cible. Les variables de déviation étant définies, il est possible de minimiser, par exemple, les déviations négatives. Les processus de minimisation peuvent être faits de différentes manières. Les plus largement utilisés dans la pratiques sont :

- a) *La Programmation de But Lexicographique (PBL) ou poids absolus aux variables de déviation. Il y a une priorisation nette des différents objectifs. Premièrement, on essaie d'atteindre le but le plus important de l'objectif. Postérieurement, les objectifs moins importants sont recherchés sous la restriction que l'approche du but par objectif n'agrandisse pas la déviation d'un objectif. Voir exemple PBL.*
- b) *Programmation de But Pondéré (PBP) ou relative. Les différents objectifs sont plus ou moins comparables. Les déviations des différents buts de l'objectif sont soupesés de telle sorte que cela représente l'importance relative des différents objectifs. Voir exemple PBP.*

Exemples de PBL et PBP

Etant donné le problème PL :

$$\text{Max } z = f(x_1, x_2) = 6250x_1 + 5000x_2$$

Soumis à :

$$550x_1 + 400x_2 \leq 15.000 \quad (c_2)$$

$$750x_1 + 575x_2 \leq 22.000 \quad (c_3)$$

$$1050x_1 + 825x_2 \leq 29.000 \quad (c_4)$$

$$1375x_1 + 1025x_2 \leq 36.000 \quad (c_5)$$

$$120x_1 + 180x_2 \leq 4000 \quad (c_6)$$

$$400x_1 \leq 2000 \quad (c_7)$$

$$450x_2 \leq 2000 \quad (c_8)$$

$$35x_1 + 35x_2 \leq 1000 \quad (c_9) \text{ et } x_1, x_2 \geq 0$$

Dans cet exemple x_1 and x_2 représentent la culture A et la culture B. La fonction objectif représente la valeur actuelle nette de l'investissement des deux cultures. c_2 - c_9 représente des contraintes concernant le capital travail (c_2 - c_5), la main-d'oeuvre temporaire (c_6 - c_8) et l'équipement (c_9).

Comme exemple d'un modèle de PB on assume que l'ensemble d'inéquations cité ci-dessus est traité comme un ensemble de buts au lieu d'un ensemble de contraintes. Pour chaque but, deux variables non-négatifs (les variables de déviation n et p) sont introduit convertir une inéquation en équation. Pour la fonction objectif on assume une valeur cible de 200.000 :

$$6250x_1 + 5000x_2 + n_1 - p_1 = 200.000 (g_1)$$

$$550x_1 + 400x_2 + n_2 - p_2 = 15.000 (g_2)$$

$$750x_1 + 575x_2 + n_3 - p_3 = 22.000 (g_3)$$

$$1050x_1 + 825x_2 + n_4 - p_4 = 29.000 (g_4)$$

$$1375x_1 + 1025x_2 + n_5 - p_5 = 36.000 (g_5)$$

$$120x_1 + 180x_2 + n_6 - p_6 = 4000 (g_6)$$

$$400x_1 + n_7 - p_7 = 2000 (g_7)$$

$$450x_2 + n_8 - p_8 = 2000 (g_8)$$

$$35x_1 + 35x_2 + n_9 - p_9 = 1000 (g_9)$$

Comme exemple de la PBL, on suppose que pour l'intéressé la première priorité est composée de buts concernant le capital travail (g_2 - g_5). Ces premiers buts doivent être satisfaits de façon absolue et présomptif ; l'intéressé veut minimiser $p_2 + p_3 + p_4 + p_5$. La seconde priorité est but g_9 (mécanisation) : l'intéressé veut minimiser p_9 . la troisième priorité concerne le but g_1 (la valeur actuelle nette) : minimiser n_1 . La dernière priorité est donnée à la minimisation de l'engagement de la main-d'oeuvre temporaire : minimiser $p_6 + p_7 + p_8$. L'intéressé est autorisé de donner des facteurs poids aux buts à l'intérieur de la même priorité. Sans les facteurs poids, tout le problème de minimisation PBL est :

$$\text{Min } a = [(p_2 + p_3 + p_4 + p_5), (p_9), (n_1), (p_6 + p_7 + p_8)]$$

Utilisant un des algorithmes possible la solution optimum est :

$$x_1 = 19,18 \quad x_2 = 9,38$$

$$n_1 = 33.250 \quad p_1 = 0$$

$$n_2 = 699 \quad p_2 = 0$$

$$n_3 = 2.221 \quad p_3 = 0$$

$$n_4 = 1.122 \quad p_4 = 0$$

$$n_5 = n_6 = 0 \quad p_5 = p_6 = 0$$

$$n_7 = 0 \quad p_7 = 5672$$

$$n_8 = 0 \quad p_8 = 2221$$

$$n_9 = 0 \quad p_9 = 0$$

Cette solution permet d'atteindre les buts des deux premières priorités. Le but de la troisième priorité n'est pas atteint : un écart négatif de 33.250. Pour ce qui est du but de la dernière priorité seule g_6 est pleinement satisfait.

Dans la PBP tous les buts sont considérés simultanément. Assumons que l'intéressé considère les buts g_2 - g_5 comme des contraintes rigides. Ainsi, on a un problème PBP avec cinq buts (g_1, g_6 - g_9) et quatre contraintes (g_2 - g_5). On peut calculer que la valeur actuelle nette maximum obtenue avec les quatre contraintes rigides g_2 - g_5 est 175.600. Les variables dans la fonction objectif doivent représenter des écarts relatifs des cibles plutôt que des écarts absolus à cause de la grande différence des unités de mesure utilisées pour les différents buts. Ainsi, le modèle minimise la somme des écarts relatifs des cibles :

Minimiser :

$$W_1 * (n_1/175.600) + W_6 * (p_6/4000) + W_7 * (p_7/2000) + \\ W_8 * (p_8/2000) + W_9 * (p_9/1000)$$

soumis à g_2 - g_5, g_1 and g_6 - g_9 .

W_1, \dots, W_9 représente les poids liés aux variables de déviation. Mathématiquement ceci est problème PL orthodoxe et ne nécessite pas une extension de l'algorithme-simplex.

Programmation à Objectifs Multiples (POM)

L'intéressé doit prendre sa décision dans un environnement à objectifs multiples où il n'y a pas nécessairement des buts spécifiés. La POM tente de distinguer la solution optimale admissible de Pareto de celles qui ne sont pas de Pareto. Les éléments de cet ensemble efficient sont des solutions admissibles telle qu'il y pas d'autres solutions admissibles qui peuvent atteindre une performance similaire ou meilleure pour tous les objectifs et elles sont strictement meilleures pour au moins un objectif. Dans l'ensemble efficient, le trade-offs entre critères peut être considéré.

Différentes techniques existent pour générer ou estimer l'ensemble efficient : a) graphiquement ; b) méthode des contraintes ; c) méthode des poids ; d) méthode simplexe multi-objectif. Seule la méthode graphique sera illustrée.

Exemple POM

Comme une illustration de la POM supposons maintenant que l'intéressé a deux objectifs : a) maximiser la valeur actuelle nette (g_1) et b) minimiser nombre d'heures de la main-d'oeuvre temporaire engagée pour la récolte (g_7 plus g_8 ; depuis $\min(x)$ est équivalent à $\max(-x)$, $\min(400x_1 + 450x_2)$ est équivalent à $\max(-400x_1 - 450x_2)$). Comme une illustration une contrainte représentant : 'superficie minimum sous culture 10 ha' a été ajoutée. On a alors le problème suivant :

Eff $Z(x) = [Z_1(x), Z_2(x)]$ (Eff : ensemble efficient, solutions optimales de Pareto)

où

$$Z_1(x) = 6250x_1 + 5000x_2$$

$$Z_2(x) = -400x_1 - 450x_2$$

soumis à

$$550x_1 + 400x_2 \leq 15.000$$

$$750x_1 + 575x_2 \leq 22.000$$

$$1050x_1 + 825x_2 \leq 29.000$$

$$1375x_1 + 1025x_2 \leq 36.000$$

$$120x_1 + 180x_2 \leq 4000$$

$$35x_1 + 35x_2 \leq 1000$$

$$x_1 + x_2 \geq 10$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

Tableau 3.3. Points extrêmes de l'ensemble réalisable. Source : Romero & Rehman, 1989.

points extrêmes	variables de décision		fonction objectif	
	poivrier -ha-x ₁	prunier -ha-x ₂	Z1 (NPV) -≤-	Z2 (heure de main-d'oeuvre temporaire)
A	10	0	62.500	4000
B	26,18	0	163.625	10.472
C	19,18	9,38	166.775	11.893
D	0	22,22	111.111	10.000
E	0	10	50.000	4500

Depuis que les trois premières contraintes sont impliquées par la quatrième, on peut omettre ces contraintes. Ce problème peut être graphiquement résolu. L'ensemble admissible F peut être représenté par le polygone ABCDE dans la [figure 3.4](#) et les cinq points extrêmes de cette région avec les valeurs des deux objectifs sont montrées dans le tableau 3.3. Les cinq points extrêmes de l'exemple dans l'espace des objectifs sont tracés dans la [figure 3.5](#). De cette figure il est facile de déduire que les segments liant A', B' et C' représentent l'ensemble efficient dans l'espace de la fonction objectif du problème analysé et les segments liant A, B et C dans la figure 3.4 représentent l'ensemble efficient dans l'espace des variables de décision.

Les points de F qui ne sont pas situés sur A'B'C' sont inférieurs ou non-efficients car ils donnent moins de valeur actuelle nette et une même valeur (ou plus) de main-d'oeuvre temporaire pour la récolte ou une même valeur actuelle nette (ou moins) et plus de main d'oeuvre temporaire pour la récolte que tout autre point de la frontières lui même. Les pentes de deux segments A'B' et B'C' représentent le trade-off (ou coût d'opportunité) entre les attributs considérés.

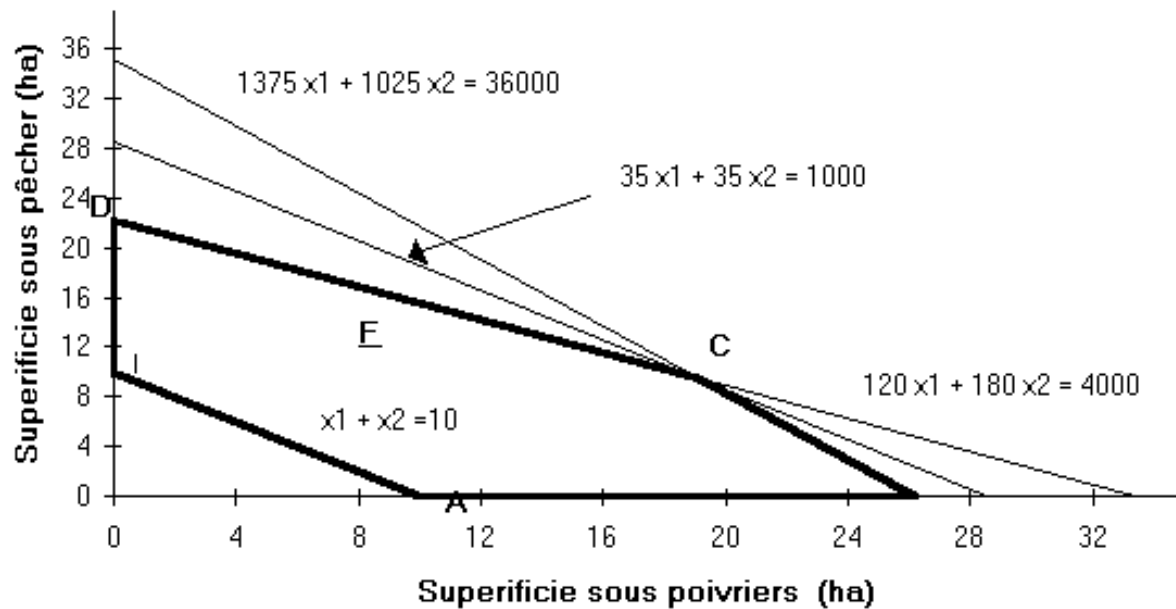


Figure 3.4. Région admissible dans l'espace des variables de décision. Source : Romero and Rehman, 1989.

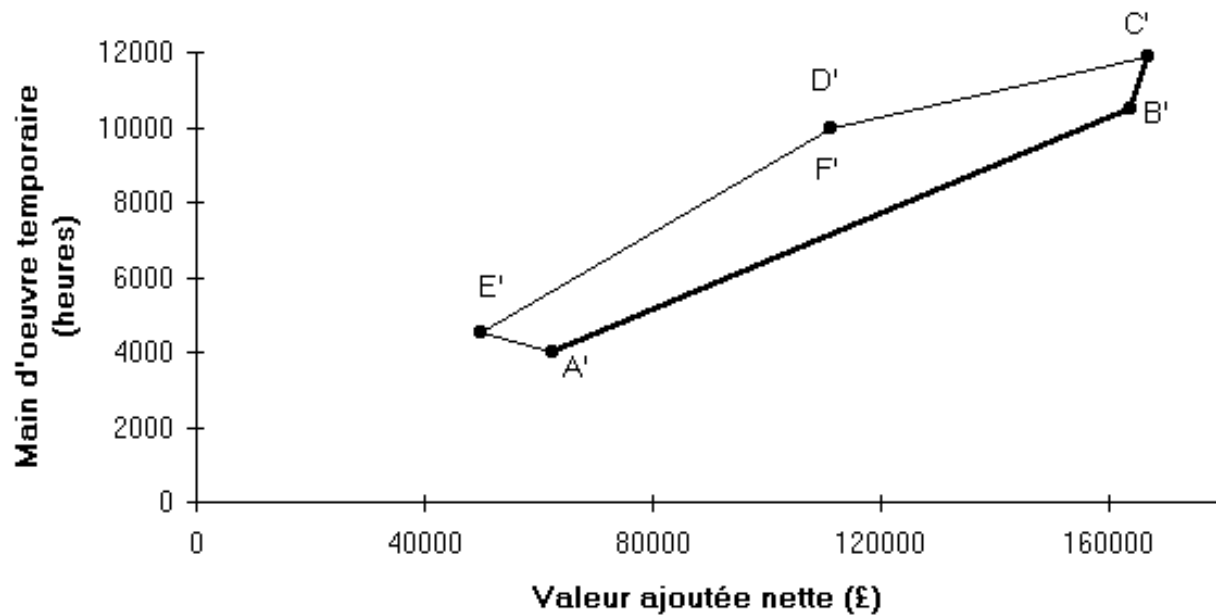


Figure 3.5. Image de l'espace admissible dans l'espace des objectifs. Source: Romero & Rehman, 1989.

Programmation de Compromis (PC)

Selon Romero & Rehman compromise programming peut être considéré comme complément naturel et logique de POM. Il détermine la solution optimale du sous-ensemble de Pareto. La PC commence par l'identification d'une solution idéale et utopique et suppose que n'importe quel intéressé cherche une solution aussi rapprochée que possible du point idéal. Pour atteindre ce rapprochement une fonction de distance est introduite dans l'analyse:

$$Pl(W) = [(\sum_{j=1}^n W_j d_j)^p]^{1/p}$$

dans laquelle W_j représente le poids de l'objectif j , et d_j le degré relatif de rapprochement entre l'objectif j et son idéal. Si tous les W_j égale un et $p=2$, $L_2(W)$ égale le concept pythagoricien de distance (e.g. la distance entre (2,6) et (5,2) : $L_2(W) = [(2-5)^2 + (6-2)^2]^{1/2} = 5$). Dans la PC la fonction de distance est minimisée.

Romero & Rehman (1989) discute les avantages et les désavantages du GP, MOP et PC (page 99-103).

Tableau 3.4. La programmation de compromis (approximation discrète). Source : Romero & Rehman (1989).

		A'	B'	C'	Z*	Z _j
VAN (Z ₁)		62.500	163.625	166.775	166.775	62.500
main d'oeuvre temporaire (Z ₂)		4000	10.472	11.893	4000	11.893
d ₁		1	0,030	0		
d ₂		0	0,820	1		
L ₁	W ₁ = 1	1	0,850	1		
L ₂	W ₂ = 1	1	0,820	1		
L ₃		1	0,820	1		
L ₂	W ₁ = 2	2	0,860	1		
L ₂	W ₂ = 2	2	0,860	1		
L ₃		2	0,820	1		
L ₁	W ₁ = 3	3	0,910	1		
L ₂	W ₂ = 1	3	0,825	1		
L ₃		3	0,820	1		

Tableau 3.4. La programmation de compromis (approximation discrète). Source : Romero & Rehman (1989).

Exemple de PC

Dans le PC l'intéressé cherche une solution aussi rapprochée que possible du point idéal (qui est le point avec les valeurs optimales de chacun des objectifs), à travers la fonction de distance. On peut déduire du tableau 3.4 que la solution idéale est la solution avec VAN (=Valeur Actuelle Nette) = 166.775 et main-d'oeuvre temporaire = 4000. Dans la Table 3 la distance relative entre chaque point efficace extrême (A', B' et C') et le point idéal est calculée pour les trois mesures de distance L_1 , L_2 et L_∞ .

comme illustration les détails des calculs relatifs à la distance entre la point B' et son idéal, selon le L_2 métrique pour $W_1 = 3$ et $W_2 = 1$, sont donnés ci-dessous :

$$L_2(3,1) = [3^2((166.775 - 163.625)/(166.775 - 62.500))^2 + 1^2((4000 - 10.472)/(4000 - 11.893))^2]^{1/2} = 0,825$$

Le tableau 3.4 montre qu'étant donnée des structures de poids w_j des trois points extrême efficaces, B' est le plus proche du point idéal, peu importe la mesure de distance utilisée. En d'autres termes, le point B' de l'espace objectif ou le point B dans l'espace des variables de décision est la meilleure solution de compromis, Selon cette « approximation discrète de la meilleure solution de compromis ». Les techniques continues de PC ne seront pas abordées.

Approches pour la prise de décision interactive à critères multiples

Cette approche implique une définition progressive des préférences de l'intéressé à travers une interaction entre lui et modèle. L'interaction devient un dialogue dans lequel le modèle répond un jeu de préférence initial de l'intéressé ou des trade-offs, et quand cette réponse est examinée un autre set pris et ainsi de suite. Ainsi le processus se poursuit de façon interactive et itérative jusqu'à ce que l'intéressé trouve une solution satisfaisante. La plupart des méthodes interactives peuvent être classifiées selon le type d'information itérative que l'intéressé veut pendant le processus interactif. Le type d'information peut être résumé en trois types de questions à l'intéressé :

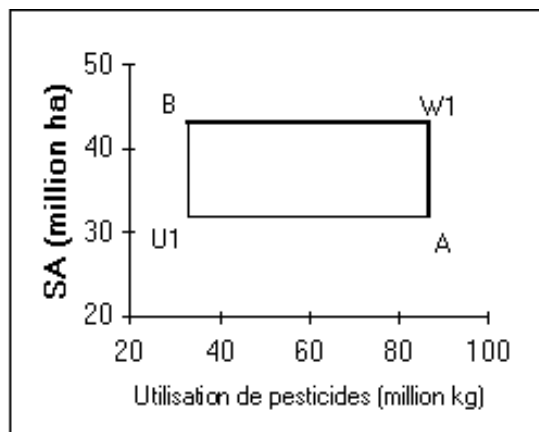
- 1) Quelle est votre trade-off entre objectifs (e.g. entre le coût de production et l'émission d'azote) ?
- 2) Acceptez-vous une augmentation du coût de | 1000,=, avec une diminution de l'émission d'azote de 50 kg/ha ?
- 3) Acceptez-vous une option d'un coût de | 1000, 700 heures de main-d'oeuvre temporaire et une émission 120 kg N/ha ?

Les deux premières questions nécessitent des informations (direct ou indirectement) au sujet du trade-offs de l'intéressé entre plusieurs objectifs. Ces genres de questions, spécifiquement le premier sont difficiles à répondre. Dans la troisième question on demande à l'intéressé s'il accepte une solution efficace admissible. S'il n'accepte pas la solution, il pourra indiquer quels objectifs peut améliorer. La méthode de Zionts et Wallenius est une des méthodes les plus populaires d'approche d'optimisation à critères multiples, qui convient au deuxième type de questions posé à l'intéressé. Les méthodes STEM et PLIBM sont des méthodes qui conviennent au troisième type de question posé à l'intéressé. L'approche PLIBM a été utilisée plusieurs fois dans les problèmes de l'utilisation de terre.

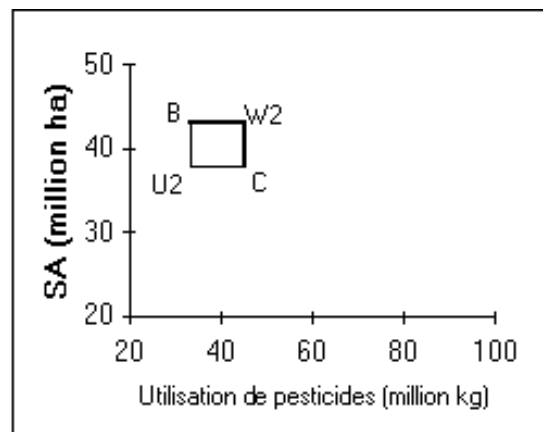
Souvent, en explorant les options d'utilisation de la terre les buts de différents objectifs ne sont pas très claires (nets). De plus, on ne sait pas quel objectifs a la plus grande priorité. Les niveaux cibles des objectifs et la priorité dépendent de la stratégie de l'intéressé. La technique PLIBM technique est un outil approprié

pour ces genres de problèmes multi-critères. De Wit et al., (1988), discutant la technique PLIBM, déclare : « ...une solution satisfaisante, du point de vu de « l'utilisateur », doit être obtenue à travers des cycles d'itérations subséquentes en verrouillant un des buts (restrictions) et en répétant le cycle de l'itération pour d'autres objectifs. Le choix des restrictions et leur degré de verrouillage reflète l'intérêt spécifique de l'utilisateur. Cette maximisation des objectifs sous verrouillage croisant des autres buts réduit l'espace admissible. De cette façon, le coût pour satisfaire un objectif en sacrifiant d'autres objectifs est exprimé. Enfin l'utilisateur se trouve en face d'un espace de solution dans lequel il ne peut aucunement améliorer un objectif sans sacrifier un autre, c'est là où il doit faire un choix. De là, l'utilisateur doit prendre conscience des possibilités d'échange entre plusieurs objectifs en terme d'autres objectifs. Bien sûr, des utilisateurs avec des intérêts et aspirations différents se retrouveront dans différents coins de l'espace admissible. »

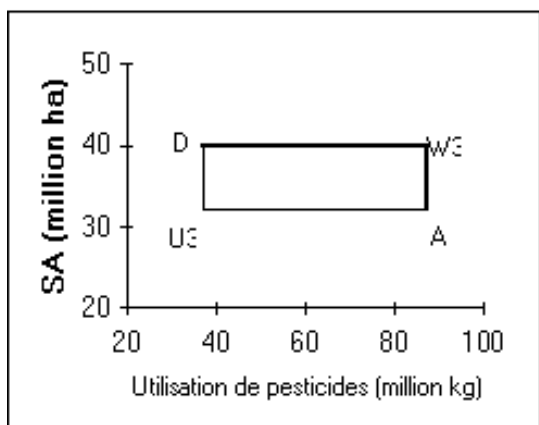
La procédure PLIBM consiste en un nombre de cycles d'optimisation. Chaque cycle comporte plusieurs optimisations. Dans chaque optimisation exécutée le modèle est optimisé pour une fonction objectif, et les objectifs sont utilisés comme des contraintes. Les limites supérieures ou inférieures peuvent être mises comme cible dans ces contraintes de but. Dans ce qu'on appelle 'cycle-zero' de la procédure, dans les exécutions subséquentes, le modèle est optimisé pour chaque fonction objectif, sans donner une limite supérieure ou inférieure aux « buts-contraintes ». Dans le cycle zéro l'espace admissible ('le terrain de jeu') des fonctions objectif est déterminée, qui est définie par les valeurs extrêmes. Ces valeurs extrêmes des fonctions objectif sont importantes dans le choix des limites supérieures ou inférieures des buts-contraintes dans les scénarios. Dans le cycle zéro la compatibilité des fonctions objectifs n'est pas examinée. Dans les cycles subséquents les limites supérieures et inférieures sont mis dans les fonctions objectifs pertinentes (du point de vue de l'intéressé), et le modèle est optimisé pour une autre fonction objectif également importante. De cette façon la compatibilité et les trade offs entre fonction objectif est investiguée.



a



b



c

Figure 3.6. Illustration graphique de PLIBM procédure avec fonctions objectifs (i) minimisation de l'utilisation des pesticides et (ii) minimisation de la superficie de terre.

La méthode PLIBM est illustrée par un exemple simple qui utilise seulement deux fonctions objectifs, superficie agricole et utilisation des pesticides pour l'agriculture d'une région (suivant Spharim et al., 1992). Les résultats pour le cycle zéro sont donnés dans la figure 3.6. La superficie agricole minimum, sans aucune limite supérieure pour les pesticides est de 32 millions d'ha (correspondant à une utilisation de pesticides de 87 millions de kg - point A), et une utilisation minimum de pesticides sans aucune limite de superficie de 33 millions kg (correspondant à une superficie de 43 millions d'ha - point B). Si les points A et B coïncident, les deux objectifs sont complètement liés, de telle que la réalisation de l'un amène la réalisation de l'autre. Il n'y a pas de conflit entre les objectifs.

Le point W1 (87, 43) représente l'utilisation des pesticides quand la superficie agricole est minimisée et la superficie agricole quand l'utilisation des pesticides est minimisée. L'intéressé n'accepte pas à accepter des valeurs élevées (basses) pour ces objectifs. Le point U1 (33, 32) combine la plus basse utilisation de pesticide avec la plus basse utilisation de la superficie agricole, et peut être considéré comme une solution utopique, car il est impossible de réaliser l'optimum de deux objectifs partiellement conflictuels simultanément.

Etant donnée la solution utopique $U1$ et la mauvaise combinaison $W1$, l'intéressé demande maintenant laquelle des valeurs supérieures des objectifs il veut amoindrir et laquelle majorer. Il faut lui expliquer que son choix ne l'oblige à rien car chaque valeur peut être reconsidérée. Supposons qu'il veut s'assurer que l'utilisation des pesticides n'excède pas 45 millions de kg. La plus mauvaise combinaison d'objectif est atteinte quand $W2$ (45, 43) comme l'indique la [figure 3.6b](#). Pour élucider quelle superficie agricole peut être atteinte avec cette limite supérieure d'utilisation de pesticides, une seconde itération est nécessaire. Dans cette itération la superficie agricole est minimisée sous contrainte d'une utilisation maximale des pesticides de 45 million kg. Le résultat est le point C (45, 38). L'alternatif utopique se déplace à $U2$ (33, 38). C'est le prix à payer pour avoir amoindri la limite supérieure d'utilisation des pesticides.

Maintenant supposons qu'après tout, l'intéressé est satisfait avec une superficie agricole de 40 millions d'ha. L'utilisation minimum des pesticides est alors 37 millions de kg (Point D (37,40)). Si l'intéressé est satisfait de la solution la procédure s'arrête, autrement il doit continuer jusqu'à ce qu'il trouve une solution appropriée.

Tableau 3.5. Résultats du cycle zéro d'un modèle PLIBM avec N fonctions objectifs (Veeneklaas, 1990).

cycle zero	resultats de l'optimisation des objectifs			valeur pire	meilleure valeur
	1	i	N		
objectif 1	b_1	.	.	W_1	b_1
objectif i	.	b_i	.	W_i	b_i
objectif n	.	.	b_N	W_N	b_N

La procédure est en principe la même si on considère plus de deux objectifs, mais le nombre d'optimisations nécessaires pour arriver à une solution satisfaisante augmente rapidement avec le nombre d'objectifs. Les résultats du cycle zéro avec la maximisation de la fonction objectif peut mis en table comme dans la tableau 3.5 (d'après Veeneklaas, 1990).

Les éléments de la diagonale b_i représentent par définition les meilleures valeurs admissibles de chaque ligne dans la matrice des résultats. Les valeurs pires w_i correspondent aux valeurs les plus basses la ligne dans la matrice des résultats. Pour chaque but il n'y pas de valeur basse quand w_i veut être admis. La liberté initiale du choix pour chaque objectif - la différence entre la pire valeur et la meilleure - est explicite de cette façon.

L'étape suivante consiste à sélectionner du vecteur w l'objectif ayant la plus mauvaise considérée comme inacceptable et à formuler une limite-inférieure supérieure pour cet objectif. Sélectionnons l'objectif i . L'optimum trouvé pour le but i dans le cycle zéro forme bien sûr la limite supérieure duquel le terme indépendant de l'objectif peut augmenté. Présuons que la limite inférieure désirée pour l'objectif i soit M_i , alors un nouveau cycle d'optimisation peut être effectuer avec cette limite inférieure de l'objectif i . Les résultats de cette optimisation sont donnés dans la tableau 3.6

Tableau 3.6. Résultats du premier cycle d'un modèle PLIBM avec N (maximisation) fonctions objectifs (Veeneklaas, 1990).

premier cycle	limite inférieure	résultat de l'optimisation des objectifs			pire valeur	meilleure valeur
		1	i	N		
objectif 1	$\geq W_1$	B_1	.	.	W_1	B_1
objectif i	$\geq M_i$.	b_i	.	M_i	b_i
objectif N	$\geq W_N$.	.	B_N	W_N	B_N

Bien sûr l'optimum de l'objectif i est toujours b_i , mais les valeurs optimales pour les autres fonctions objectifs, sont probablement basses, à cause de la limite inférieure exigée pour l'objectif i . Une comparaison des meilleures valeurs du cycle zéro (tableau 3.5) avec celles du troisième cycle (tableau 3.6) peut révéler des conflits possibles entre objectifs. Un non changement dans la valeur optimale d'un objectif particulier implique l'absence de conflit à cette étape entre cet objectif et celui pour lequel la limite inférieure a été donnée (objectif i). Dans des cycles tôt cela est possible, mais dans cycles plus allongés ceci devient rare.

La procédure d'optimisation consiste en des subsequences d'optimisation comme décrit ci-dessus. A chaque étape les 'coûts' sont révélés de sauvegardant un niveau minimum pour chaque objectif particulier en termes des niveaux maximums admissibles pour les autres fonctions objectifs. Cette information aide à décider quelle est l'exigence pour le verrouillage suivant, et quoi étendre. De cette façon les combinaisons de buts réalisables peuvent être explorées jusqu'à ce qu'une seule combinaison reste. En général la procédure s'arrête plus tôt., laissant une superficie avec laquelle toutes les fonctions objectifs ont des valeurs acceptables : la « porte des opportunités » ou « l'espace des solutions ».

Romero & Rehman (1989) résument les principaux avantages et désavantages de l'approche optimisation à critères multiples :

Avantages :

- Il représente un processus d'apprentissage à l'intéressé qui lui permet de mieux comprendre le système analysé.
- Les informations nécessaires concernent seulement les préférences locales de l'intéressé, quel est son attitude face à une certaine solution ou par rapport à un certain ensemble de trade-offs.
- En général, les hypothèses à la base d'un modèle interactif sont moins restrictives que ceux exigés pour l'utilisation des techniques non-interactifs.

Quelques difficultés de l'approche interactive sont :

- L'effort et l'implication nécessaires de l'intéressé en utilisant le modèle est considérable, surtout si on les compare avec les méthodes non-interactives.
- Contraire à ce qui est supposé, il arrive souvent que l'intéressé ne prend pas toutes ses décisions de façon consistante.

3.4. Deux logiciels d'optimisation

3.4.1. LP 88

Le logiciel d'optimisation [Lambda][Pi]88 est un programme sur ordinateur très simple. Il sera utilisé dans ce cours pour permettre aux participants de s'initier et de se familiariser avec un ordinateur (PC) et de résoudre des problèmes d'optimisation. Dans cette section la façon d'utiliser le LP88 sera brièvement expliquée à l'aide d'un exemple simple.

Supposons qu'un paysan veut cultiver du maïs et du manioc. Les marges brutes par hectare sont 1000 et 750 \$ respectivement pour les mêmes cultures. Les besoins en main-d'oeuvre sont 50 et 75 hommes-jour respectivement pour le maïs et le manioc. La taille de la ferme est 10 ha et le paysan a 350 hommes-jours disponibles. Le problème LP88 à résoudre est : quelle superficie le paysan doit allouer à chaque culture pour obtenir le maximum de marges brutes. Etape par étape on montrera comment on peut résoudre ce problème à l'aide du LP88.

Le logiciel LP88 est déjà installé sur votre ordinateur. On peut commencer en tapant « LP88 ».

- Si l'ordinateur est connecté à une imprimante, taper le nom de l'imprimante quand la question suivante vous sera posée « Destination for listings (Printer or file name) ». Si votre ordinateur n'est pas connecté à une imprimante tapez PR.txt.

- Maintenant allez à « BEGIN » et pressez « ENTER »
- Pressez « F1 » (=setup)
- Pressez « F2 » (= Nouveau problème)
- Tapez le nom du nouveau problème. Par exemple « test1 »
- Pressez « ENTER »
- S'il s'agit d'un problème de maximisation tapez « MAX »
- Il y a deux contraintes, tapez « 2 »
- Il y a deux variables d'écart, « 2 »
- Tapez « F3 » pour visualiser la matrice
- Il est recommandé de donner des noms aux activités et contraintes qu'on peut reconnaître.

Pour les activités, par exemple

X1 = Maïs

X2 = Manioc

Pour les contraintes, par exemple

Y1 = Main-d'oeuvre disponible

Y2 = hectares de terre disponibles

Une fois la matrice étant rempli avec les coefficients activités, elle apparaîtra comme suit :

MAX	Maïs	Manioc	RHS
Revenu	1000	1750	
Terre	1	1	10
Main-d'oeuvre	50	75	350

- Après avoir pressé deux fois « F10 » tapez « F2 »
- Si vous tapez maintenant « ENTER » le problème sera résolu.. Pouvez-vous interpréter les résultats ?

3.4.2. XPRESS-MP

Un exemple

Le deuxième logiciel est introduit à travers un exemple.

Considérons une exploitation avec un nombre d'actifs de 15 et une certaine disponibilité en terre. Trois cas, A, B et C, seront examinés avec une disponibilité en terre de 4, 6, et 2 ha, respectivement. Le problème considéré est : comment répartir la superficie disponible entre les cultures de maïs et de coton pour avoir un revenu net aussi élevé que possible ? D'autres données pertinentes de l'exploitation sont les suivantes :

	unité	maïs	coton
revenu net	F cfa ha ⁻¹	35.000	50.000
besoin en main d'oeuvre (période de pointe)	actif ha ⁻¹	3	5

Le problème pour le cas A se traduit dans le programme linéaire suivant :

	Max : 35.000 *	Supm	+	50.000 *	Supc	{ fonction objectif }
sous conditions :		Supm	+		Supc ≤ 4	{ restriction disponibilité en terre }
	3 *	Supm	+	5 *	Supc ≤ 15	{ restriction disponibilité main d'oeuvre }
		Supm	≥	0	Supc ≥ 0	{ conditions de non-négativité }

Les variables de décision sont Supm et Supc, qui désignent les superficies en maïs et coton, respectivement. Les coefficients techniques utilisés dans ce problème sont les coefficients des variables de décision dans la fonction objectif (35.000 et 50.000) et dans les restrictions (1, 1, 3, et 5) et les termes indépendants (4 et 15), qui dans ce cas décrivent la disponibilité en ressources (terre et main d'oeuvre). Pour les cas B et C il suffit de changer le terme indépendant de la restriction de terre de 4 en 6 et 2, respectivement.

Les solutions pour les trois cas A, B, et C peuvent être décrites comme suit :

	A	B	C
Supm	2,5	5	0
Supc	1,5	0	2
Terre			
Disponibilité	4	6	2

Utilisation	4	5	2
Coût d'opportunité	12.500	0	50.000
Main d'oeuvre			
Disponibilité	15	15	15
Utilisation	15	15	10
Coût d'opportunité	7500	11667	0
Valeur fonction objectif	162.500	175.000	100.000

La solution indique les valeurs des variables de décision, quelques statistiques pour les restrictions et la valeur de la fonction objectif. Dans le cas B c'est uniquement la main-d'oeuvre qui limite la valeur de la fonction objectif. Celle-ci est maximale dans ce cas si la main-d'oeuvre est valorisée autant que possible, ce qui explique le choix unique pour la culture de maïs. Cette culture valorise la main d'oeuvre à $35.000/3$ (Fcfa actif⁻¹), le coton la valorise à $50.000/5$. La terre est (relativement) abondante de sorte que seulement 5 des 6 ha sont exploités. Une augmentation de la disponibilité en terre n'aurait aucun effet sur la solution optimale. Cela se voit aussi à travers la valeur du coût d'opportunité de la terre qui indique sa valeur marginale (en unité de la fonction objectif par unité de restriction, ici : en Fcfa ha⁻¹), autrement dit : la valeur avec laquelle la fonction objectif augmenterait (ou diminuerait) si la disponibilité en terre augmenterait (ou diminuerait) d'une unité (ha). Pour le cas B cette valeur est zéro pour la terre. Pour la main d'oeuvre on trouve une valeur marginale de 11.667 Fcfa actif⁻¹ (dans la période de pointe). Un actif additionnel serait utilisé pour cultiver encore plus de maïs, un tiers d'un ha ce qui ajouterait $35.000/3=11.667$ au revenu net.

Pour le cas C c'est la main d'oeuvre qui est relativement abondante. Sa valeur marginale est zéro. Dans cette situation c'est la terre disponible qui est à utiliser et à valoriser autant que possible, ce qui se fait par la culture unique de coton (50.000 ha⁻¹ contre 35.000 ha⁻¹ pour le maïs). Notez que cela peut changer au moment qu'il y aurait une possibilité de cultiver plus de terre. La valeur marginale d'un ha est donc de 50.000 Fcfa ha⁻¹. Cette valeur peut aussi être interprétée comme le prix maximum pour un ha de plus que le décideur serait prêt à payer selon le modèle.

La situation A est un peu plus complexe, comme les deux ressources limitent la valeur maximale de la fonction objectif. Toutes les deux ont une valeur marginale positive, mais moins élevée que pour le cas où l'autre ressource est abondante. C'est la raison pour laquelle la valeur de la main-d'oeuvre et celle de la terre sont maximisées. On trouve donc une solution dans laquelle les deux cultures sont utilisées.

Deux principes économiques sont ainsi illustrés à partir des trois situations :

- La loi de la diminution de la valeur marginale d'un facteur productif est illustrée si on suit la valeur marginale de la terre à travers les cas C, A, B. Elle baisse de 50.000 à 12.500 puis s'annule.

- En augmentant la disponibilité d'un facteur de production (ici : terre), tant qu'il soit limitatif, l'efficacité (la productivité) d'autres facteurs de production (ici : main d'oeuvre) augmentent. La valeur marginale de la main d'oeuvre augmente de zéro à 7.500 puis à 11.667 par suite de l'augmentation en disponibilité en terre. C'est ce principe qui constitue un argument important pour l'intensification et l'utilisation des intrants externes.

La langue de modélisation utilisée

L'utilisation du modèle PL passe par deux étapes qui sont exécutées à l'aide d'un logiciel du nom « XPRESS-MP ». D'abord le modèle est lu par ce qu'on appelle « modélisateur ». En utilisant la spécification des variables, les restrictions, l'objectif et les coefficients techniques, ce programme met le modèle dans la forme d'un programme linéaire proprement dite. La deuxième phase consiste à calculer la solution optimale au problème ainsi spécifié. Cela se fait à l'aide de «

l'optimisateur ». La solution est écrite sur un fichier de texte accessible à n'importe quel logiciel de traitement de texte, et aussi à des logiciels-tableurs comme le MS-Excel.

Pour mieux faire comprendre le modèle, il est préférable de revenir à l'exemple du sous-chapitre précédant et de donner le modèle dans une forme lisible comme pour le logiciel XPRESS-MP.

MODEL exemple ! Nom du modèle

VARIABLES

Supm ! Superficie maïs

Supc ! Superficie coton

CONSTRAINTS

*obj : 35.000*Supm + 50.000 * Supc \$! fonction objectif*

terre : Supm + Supc < 4 ! restriction pour la terre

*mo : 3*Supm + 5* Supc < 15 ! restriction pour la main d'oeuvre*

Ce modèle est constitué des parties suivantes :

MODEL donne un nom au modèle ;

VARIABLES définit les variables du modèle ;

CONSTRAINTS décrit les restrictions et les objectifs. Le modèle reconnaît un objectif, si l'expression n'est pas une (in)égalité, mais si c'est suivi par un « \$ ».

L'exigence de non-négativité des variables est incluse automatiquement. L'ordre des trois lignes n'est pas important.

Notez le format des restrictions et objectifs. Le nom vient d'abord, suivi par « : », et ensuite la spécification de l'expression d'une manière qui est presque égale à celle utilisé dans la mathématique. Une différence est que les signes « < » et « > » désignent les symboles mathématiques « ≤ » et « ≥ », respectivement. Noter également que le texte qui vient après un signe d'exclamation (!) est commentaire, et n'influence pas le modèle en tant que tel. Pour la compréhension humaine, les commentaires dans le texte du modèle sont néanmoins très utiles.

Pour un programme linéaire avec par exemple deux cents au lieu de deux variables, la spécification des restrictions et des objectifs devient un problème (les lignes deviennent très longues ; des erreurs sont difficiles à trouver). C'est pourquoi il y a des possibilités pour faciliter la spécification des restrictions, des objectifs et aussi des variables. Ces possibilités sont expliquées à travers une autre spécification du même problème.

MODEL exemple ! Nom du modèle

LET NAC = 2 ! Nombre d'Activités Culturelles

LET mo_disp = 15 ! Disponibilité en main d'oeuvre

LET ter_disp = 4 ! Disponibilité en terre

VARIABLES

*AC(NAC) ! Activités Cultureles [ha]***TABLES***Bmo (NAC) ! Besoin main d'oeuvre période de pointe [homme ha⁻¹]**Rev_net (NAC) ! Revenu net par activité culturelle [Fcfa ha⁻¹]***DISKDATA***Bmo = C : \XPRESS\DATA\bmo_exem.dat**Rev_net = C : \XPRESS\DATA\rnet_ex.dat***CONSTRAINTS***obj : SUM(j=1 :NAC) Rev_net(j) * AC(j) \$**terre : SUM(j=1 :NAC) AC(j) < ter_disp**mo : SUM(j=1 :NAC) Bmo(j) * AC(j) < mo_disp*

Considérons d'abord les parties déjà connues, dont la partie MODEL n'a pas changé. Dans la section VARIABLES on trouve au lieu de deux noms un seul nom, mais avec, entre parenthèses, la dimension de la variable. Cette dimension a la valeur NAC, qui est égale à 2, selon la deuxième ligne du modèle. Donc ici on a aussi défini 2 variables : AC1 et AC2 qui correspondent avec Supm et Supc de l'autre modèle. Si on assignait la valeur 200 à NAC, l'expression AC(NAC) aurait défini 200 variables AC001, ..., AC200.

Dans la section CONSTRAINTS les noms des restrictions et de la fonction objectif n'ont pas changé. L'expression qui suit (pour le cas de la fonction objectif) désigne la somme des produits des facteurs Rev_net (j) et AC (j), pour j=1,..., NAC. L'expression équivaut donc à l'équation suivante :

$$Rev_net(1) * AC(1) + Rev_net(2) * AC(2)$$

ce qui correspond exactement à l'expression de la fonction objectif du modèle précédent si Rev_net (1) et Rev_net (2) ont les valeurs 35000 et 50000. Le vecteur ou tableau de données Rev_net est défini dans la section TABLES avec une même dimension que vecteur de variables AC. Mais les valeurs stockées dans le tableau Rev_net ne sont données dans le texte du modèle, mais le modèle indique le fichier où ces données sont stockées dans la section DISKDATA. Dans ce cas le fichier est MET_EX.DAT. Les données de l'autre tableau défini (Bmo) se trouvent dans le fichier BMO_EXEM.DAT et doivent correspondre aux besoins en main d'oeuvre pour les deux cultures. Les termes indépendants des deux restrictions, enfin, sont identiques avec ceux du modèle précédent, comme le montrent les expressions qui commencent par LET.

Récapitulatif, les nouvelles sections utilisées sont les suivantes :

TABLES définit les tableaux (nom et dimension) dans laquelle des coefficients techniques sont stockés ;

DISKDATA indique pour chaque tableau le nom du fichier qui contient les données à stocker.

Les lignes qui commencent par le mot LET définissent des coefficients auxiliaires d'une dimension une (1). De telles lignes peuvent paraître partout dans le modèle. Enfin, noter la formulation conçue des sommes de beaucoup de facteurs à l'aide de l'expression SUM.

Faire tourner le modèle

Pour savoir comment faire tourner un modèle conçu, référer aux documents qui accompagnent le logiciel. Il s'agit notamment du document « A quick tour of XPRESS-MP for Windows ». Pour les détails sur les possibilités détaillées du logiciel référer au document « users guide », qui aussi accompagne le logiciel.

3.5. Exercices

Formulation d'un problème PL

(1) Transformez le problème PL suivant en forme standard

$$\text{Min } \{20x_1 - 10x_2 + 30x_3 + 1992\}$$

$$-x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 4$$

$$3x_1 - x_2 + 2x_3 \leq 9$$

$$2x_1 + x_2 - x_3 \geq 2$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \leq 0, x_3 \text{ libre}$$

(2) Transformez le problème PL suivant en forme standard

$$\text{Min } \{w = 4x_1 + 5x_2 + 6x_3\}$$

$$x_1 - 2x_2 + 3x_3 \leq 6$$

$$-2x_1 + 3x_2 - x_3 \geq 7$$

$$x_1 + x_2 + x_3 = -3$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \leq 0, x_3 \text{ libre.}$$

(3) Un paysan veut faire un plan optimal de gestion de son champ de Mai à Octobre

activités	besoins en main-d'oeuvre en heures ha ⁻¹						bénéfice \$ ha ⁻¹
	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	
blé	2			45			2500
pomme de terre	24	17	5		198		4000
betterave	158	98	11			120	4500

disponibilité main-d'oeuvre (h)	350	300	250	250	400	400	
---------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	--

Il possède 60 ha.

Les contraintes de rotation de culture :

- le blé peut être culture sur au plus 1/2 ha de la superficie totale,
- la pomme de terre sur au plus 1/3 ha de la superficie totale,
- la betterave sur au plus 1/4 de la superficie totale.

Le paysan veut maximiser son bénéfice pour l'ensemble de son champ. Formuler ce problème comme un problème de programmation linéaire.

Solution de problèmes PL

(4) Etant donné le problème PL suivant :

$$\max \{w = 3x_1 + x_2\}$$

$$x_1 + x_2 \leq 5$$

$$x_1 + 2x_2 \leq 8$$

$$x_1 \leq 4$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$$

a. résolvez graphiquement ce problème.

b. faites le tableau du simplexe.

c. résolvez ce problème avec l'algorithme du simplexe

d. marquez sur la figure a les points angulaires correspondant aux solutions de base de c.

e. Avec combien d'unités la fonction objectif a-t-elle augmenté, quand

- la contrainte 1 est allégée d'une unité,
- la contrainte 2 est allégée d'une unité
- la contrainte 3 est allégée d'une unité

f. faites l'analyse de sensibilité pour les termes indépendants des contraintes.

g. faites l'analyse de sensibilité pour les coefficients de la fonction objectif.

(5) Résolvez le problème PL suivant avec l'algorithme du simplexe

$$\text{Max } \{w = 6x_1 - 15x_2 + 8x_3\}$$

$$-x_1 + x_2 - x_3 \leq 1$$

$$x_1 - 2x_2 + x_3 \leq 7$$

$$-x_1 + 2x_2 + x_3 \leq 4$$

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0$$

(6) Utilisation du logiciel d'optimisation LP88 : exercice 1

(Exercice développé par C.Schweigman (1993), pp. 55 - 57)

a) La planification des activités agricoles sur une période d'un an, doit se faire dans la situation où une parcelle de terres de superficie A peut être divisée en deux parties respectives A1 et A2 et de fertilité différente. On suppose que l'on peut cultiver les mêmes cultures sur les deux parties avec des rendements différents. Nous allons construire un modèle de programmation linéaire pour établir un plan agricole. Tout comme au paragraphe 3.2.9, nous allons introduire les variables x_j , $j = 1, 2, \dots, n$; soit $q \leq n$, les cultures $j = 1, 2, \dots, q$ sont cultivées sur A1 et les cultures $j = q + 1, q + 2, \dots, n$ sur A2.

b) En supposant que le maïs est cultivé sur deux parcelles de fertilité différente, comment peut-on modifier le modèle de programmation linéaire du paragraphe 3.2.9 en vue de planifier la production de maïs dans le village Tagota en Tanzanie ? On suppose que sur l'une des parcelles, les données concernant le rendement et le travail sont celles du paragraphe 3.2.9 ; alors que sur l'autre parcelle, on suppose que le rendement du maïs est 20 % plus élevé, que la main-d'oeuvre exprimée dans (11) et (12) est 30 % plus élevée, et 20 % plus élevée dans (13). En négligeant la contrainte de demande alimentaire, montrer que l'on a la formulation suivante :

$$\text{Maximiser } 620x_1 + 520x_2 + 720x_3 + 620x_4 + 764x_5 + 664x_6 + 864x_7 + 764x_8 - 576$$

Sous les contraintes :

$$2x_1 + 2x_2 + 2x_5 + 2x_6 \leq 600$$

$$24x_3 + 24x_4 + 24x_7 + 24x_8 \leq 300$$

$$30x_1 + 35x_2 + 120x_3 + 125x_4 + 39x_5 + 44x_6 + 156x_7 + 161x_8 \leq 3375$$

$$135x_1 + 135x_3 + 175,5x_5 + 175,5x_7 \leq 2250$$

$$30x_1 + 30x_2 + 30x_3 + 30x_4 + 36x_5 + 36x_6 + 36x_7 + 36x_8 \leq 2250$$

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, 8.$$

Quelle est la vraie signification des variables ? En introduisant les variables d'écart $x_9, x_{10}, \dots, x_{13}$ pour remplacer les inégalités ci-dessus par des égalités, les contraintes ci-dessus peuvent s'écrire :

$$2x_1 + 2x_2 + 2x_5 + 2x_6 + x_9 \leq 600$$

$$24x_3 + 24x_4 + 24x_7 + 24x_8 + x_{10} \leq 300$$

$$30x_1 + 35x_2 + 120x_3 + 125x_4 + 39x_5 + 44x_6 + 156x_7 + 161x_8 + x_{11} \leq 3375$$

$$135x_1 + 135x_3 + 175,5x_5 + 175,5x_7 + x_{12} \leq 2250$$

$$30x_1 + 30x_2 + 30x_3 + 30x_4 + 36x_5 + 36x_6 + 36x_7 + 36x_8 + x_{13} \leq 2250$$

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, 8.$$

La solution de ce programme linéaire est la suivante :

$$x_3 = 7,9 ; x_5 = 6,7 ; x_6 = 49,2 ; x_9 = 488,2 ; x_{10} = 110,3 \text{ \u00c0cre.}$$

$$x1 = x2 = x4 = x7 = x8 = x11 = x12 = x13 = 0$$

Vérifier ce résultat, soit en résolvant le programme linéaire ci-dessus à l'aide d'un ordinateur, soit en procédant comme suit : suivre les indications données à l'Annexe A et exprimer les variables de base $x3$, $x4$, $x6$, $x9$, et $x10$ en fonction des variables hors base $x1$, $x2$, $x4$, $x7$, $x8$, $x11$, $x12$, $x13$. Remplacer dans la fonction objective les variables de base en fonction des variables hors base ; on obtient alors une fonction linéaire de variables hors base dont les coefficients sont négatifs. Dire pourquoi ce résultat signifie que l'on a bien une solution du programme.

c) De la même façon, vérifier la solution du programme (16).

(7) LP88, Exercice 2 : Choix entre cultures vivrières et cultures de rente

Dans un village situé dans la région Mwanza en Tanzanie, 600 personnes adultes cultivent le coton comme culture de rente, le maïs et le manioc comme cultures vivrières. Nous voulons savoir s'il est profitable pour elles d'acheter le maïs et le manioc sur le marché local afin de consacrer plus de temps à la production du coton. Dans ce village, on emblave le coton en novembre et décembre, le maïs et le manioc en novembre, décembre, janvier et février. On introduit les variables suivantes :

$x1$ superficie (en ha) occupée par le coton emblavé en novembre et décembre

$x2$ superficie (en ha) occupée par le maïs semé en novembre et décembre

$x3$ superficie (en ha) occupée par le maïs semé en janvier et février

$x4$ superficie (en ha) occupée par le manioc planté en novembre et décembre

$x5$ superficie (en ha) occupée par le manioc planté en janvier et février.

Le tableau suivant donne, pour le coton, le maïs et le manioc, la valeur de l'intrant travail nécessaire par deux mois, mesurée en jours de travail par ha.

Intrant travail nécessaire tous les deux mois, en jours de travail par ha pour le cultiver le coton, le maïs et le manioc, dans la région Mwanza, en Tanzanie.

superficie culture période de semis	x1 coton nov-déc	x2 maïs nov-déc	x3 maïs janv-fév	x4 manioc nov-déc	x5 manioc jan-fév
jan-fév	19	15	20	5	35
mars-avr	12	0	5	0	5
mai-juin	13	4	0	0	0
jui-aout	37	0	2	0	0
sept-oct	14	0	0	0	0
nov-déc	33	35	0	35	0

En utilisant le tableau et les informations selon lesquelles 600 personnes participent aux activités agricoles, un mois comporte 25 jours de travail, on peut formuler les contraintes de main-d'oeuvre comme suit :

$$19x_1 + 15x_2 + 20x_3 + 5x_4 + 35x_5 \leq 30.000 \text{ (jan-fév)}$$

$$12x_1 + 5x_3 + 5x_5 \leq 30.000 \text{ (mar-avr)}$$

$$13x_1 + 4x_2 \leq 30.000 \text{ (mai-juin)}$$

$$37x_1 + 2x_3 \leq 30.000 \text{ (juil-août)}$$

$$14x_1 \leq 30.000 \text{ (sep-oct)}$$

$$33x_1 + 35x_2 + x_4 \leq 30.000 \text{ (nov-déc)}$$

(8) LP88, Exercice 3 : Un paysan Pakistanais (développé par Prof. J.M. Boussard)

Un paysan Pakistanais possède 15 âcres de terre, et sa famille peut fournir une main-d'oeuvre familiale équivalente à 5 hommes-jour par an. Il peut choisir entre quatre cultures, avec les coûts et revenus suivants :

culture	rendement /âcre (t ou rupees)	coût (rupees/âcre)	prix (rupees/t ou par âcre)
blé	3	1040	1055
riz	2	1826	3276
canne à sucre	6	3789	1686
fouillage et élevage	5669	1669	1

Au même moment le nombre de jours de travail estimé par culture est indiqué comme suit :

culture	jours de travail par âcre
blé	13,5
riz	32,0
canne à sucre	94,0
fodders (an dcattle raising)	53,0

Les besoins en eau par culture sont les suivantes :

culture	besoins en eau (1000 mètres cubes/âcre)
blé	20

riz	80
canne à sucre	60
fodders	30

Le nombre de jours de travail utilisable par travailleur est environ 100 l'an. Le blé occupe la terre en hiver, le riz en été, et la canne à sucre et le fodder, toute l'année.

Utilisez le LP88 pour faire ce qui suit :

(a) Construisez la matrice représentant le problème PL du paysan. Remarquez que le paysan est en cours d'argent, de telle sorte que le coût ne peut pas dépasser 30 000 rupees. Aussi, un acre de terre admet 17 000 mètres cubes d'eau.

Résolvez le problème.

(b) Il est possible de louer de la terre pour un coût de 2000 rupees par an, la main-d'oeuvre extérieure est engagée à 30 rupees par jour et pour avoir de l'eau chez les voisins il faut payer 4,72 rupees par mètre cube.

Modifier le modèle en introduisant les nouvelles activités. Résolvez le problème.

(c) Il est possible d'avoir un prêt bancaire moyennant un taux d'intérêt de 14 %. Introduisez cette possibilité dans le modèle et résolvez. Conclusion ?

(d) Les déviations standards de ces revenus sont :

culture	déviations standards des revenus
blé	317
riz	1431
canne à sucre	1271
fourrages	904

Les besoins minimums en argent pour faire vivre la famille s'élèvent à 30.000 rupees. Construire la matrice de risque FLCP associée au dernier modèle et résolvez

Conclusion ?

(9) Utilisation du logiciel XPRESS-MP, exercice 1.

Etant donné problème PL de notre exemple :

Schéma 1. Un exemple de problème PL.

$$\text{maximiser } \{w = 2x_1 + 5x_2\} \text{ (en t)} \quad (1)$$

$$\text{soumis à} \\ x_1 + x_2 \leq 6 \text{ (contrainte de superficie totale)} \quad (2)$$

$$x_1 \geq 4 \text{ (contrainte de marché de blé)} \quad (3)$$

$$x_2 \leq 3 \text{ (contrainte de superficie de pomme de terre)} \quad (4)$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \quad (5)$$

ou x_1 = nombre d'hectares sous blé (ha)

x_2 = nombre d'hectares sous pomme de terre (ha)

a. Résolvez ce problème avec XPRESS

b. Ajoutez une activité de culture de betterave avec un rendement en matière sèche de 4 t.

c. Changez la contrainte de terre pour la pomme de terre en contrainte de superficie pour la pomme de terre et la betterave : $x_2 + x_3 \leq 3$.

d. Résolvez ce nouveau problème PL.

e. Quelles activités de culture ont un « coût réduit » ('reduced cost'). Pourquoi ? Expliquez le « coût réduit ».

(9) XPRESS, exercice 2

Résolvez le problème de l'exercice 4 et les questions sous 4e, f et g avec XPRESS-MP.

(9) XPRESS, exercice 3.

Résolvez le problème de l'exercice 5 avec XPRESS-MP.

4. Méthodologie pour des études exploratoires d'utilisation de la terre

Dans ce chapitre plusieurs aspects de la méthodologie pour d'études exploratoires d'utilisation de terre sont présentés et discutés. La figure 4.1 résume ces différents aspects méthodologiques et est une extension de la [figure 2.1](#). La base de la quantification des relations intrants/extrants concernant les activités agricoles est formée par une évaluation de la ressource terre. ([Chapitre 4.2](#)). Postérieurement les définitions et les concepts de base qui sont importants dans la quantification des relations intrants/extrants sont présentés ([Chapitre 4.3](#)). Le [Chapitre 4.4](#) traite la quantification des contraintes diverses et le [Chapitre 4.5](#) traite l'identification des vues politiques et des fonctions objectifs. La génération des scénarios d'utilisation de la ressource terre à l'aide du modèle PLIBM est

présentée dans le [Chapitre 4.6](#) et finalement les aspects importants de l'analyse de sensibilité seront discutés dans le [Chapitre 4.7](#). Cependant, avant de donner une description détaillée de la méthodologie, des choix appropriés concernant les frontières du système à étudier doivent être faits ([Chapitre 4.1](#)).

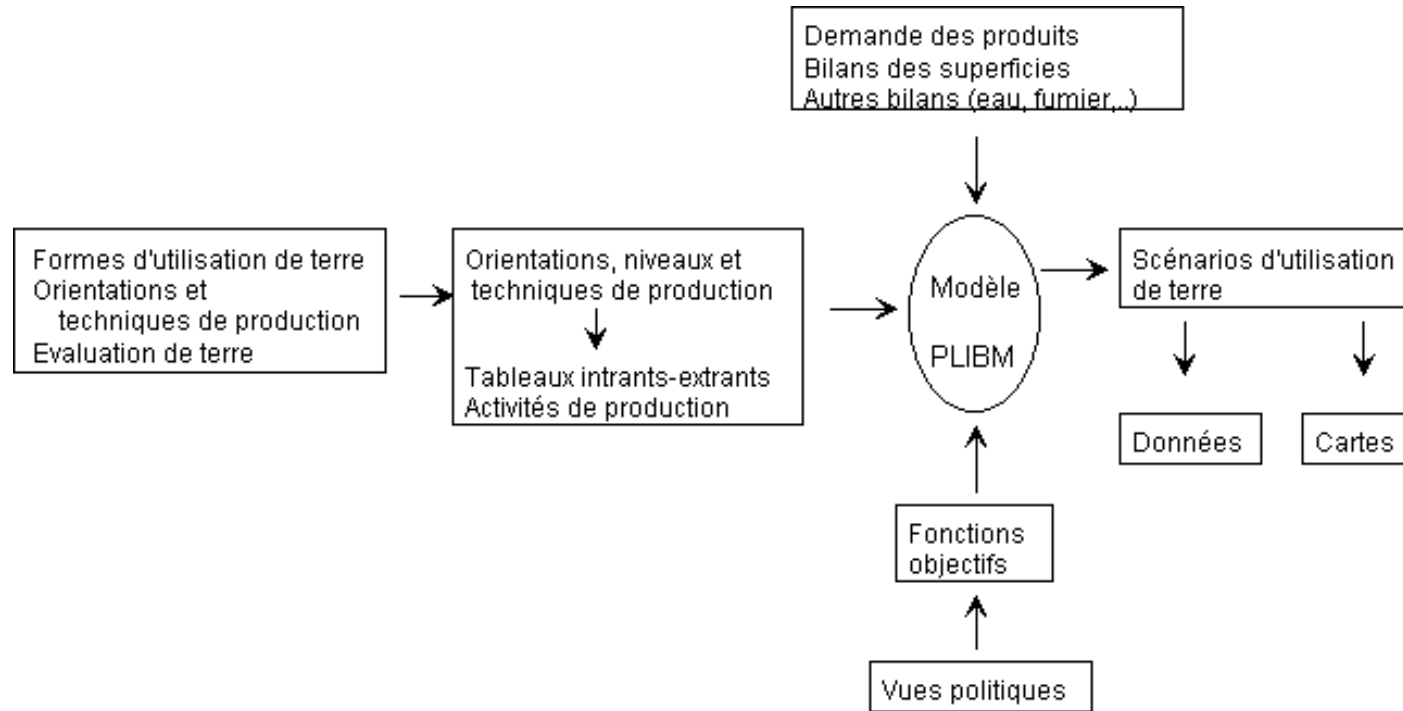


Figure 4.1. Différents aspects méthodologiques des études exploratoire d'utilisation de terre.

4.1. Définition du système

Le système doit être défini en, crudement, trois dimensions : le temps, l'espace et l'influence de l'homme. L'horizon temporel de l'étude dépend, bien sûr, des buts et des motifs de l'étude. Cependant l'horizon temporel est, en général, au moins 15 ans, tel que des ruptures sont possibles. L'horizon temporel affecte les choix des techniques de production..

Les buts et les motifs de l'étude déterminent aussi la définition du système dans l'espace. Pour des études au niveau régional, les limites du système sont habituellement déterminées par les facteurs géographiques et administratives. La méthodologie peut être appliquée à une région dans un pays (Cas de la 5^e région du Mali, cas la zone atlantique de Costa Rica), à un pays, à un groupe de pays (cas de l'union Européenne) ou à un continent (ou à une partie d'un continent). Des études au niveau paysan peuvent porter par exemple sur une ferme spécifique, sur une ferme type, ou sur une ferme moyenne dans une région spécifique.

La définition du système dans sa dimension de l'influence de l'homme est plus complexe. Des choix concernant des secteurs économiques (agriculture, récréation, industrie etc..) et des systèmes de production (cultures arables, élevage, horticulture, pisciculture) sont relativement faciles. Cependant des choix concernant les facteurs socio-économiques et les contraintes relatifs à inclure dans de telles études sont plus difficiles. Que faire des infrastructures (récentes), des niveaux de connaissance des paysans (récentes), des (nouveaux) techniques de gestion et des (récentes) structures sociales ? Plus l'horizon temporel est

grand plus l'étude est exploratoire et plus ces facteurs sont variables. Un souhait politique et une politique appropriée peuvent influencer ces facteurs. Plus l'horizon temporel d'une étude est grande (p.e. 25 ans) plus on peut considérer ces facteurs optimales ou plus on peut les exclure du modèle. Tant bien que mal, il est important d'être explicite dans les choix concernant la définition de la dimension de l'influence par l'homme d'un système.

4.2. Evaluation de la ressource terre

Dans les études exploratoires d'utilisation de terre on n'est pas tout d'abord intéressé à par l'utilisation actuelle de la terre et par les techniques actuelles de production, mais on s'intéresse aussi au potentiel et aux nouvelles formes d'utilisation de la ressource terre et aux nouvelles techniques de production réalisable dans l'horizon temporel de l'étude. Dans l'évaluation de la ressource terre les caractéristiques des sols et du climat en unité spatiale sont confrontées aux exigences de plusieurs formes d'utilisation de la ressource terre. Cette confrontation peut être qualitative, une unité spatiale est appropriée pour une forme d'utilisation de la ressource terre ou non, ou quantitative ce qui donne des informations sur la mesure dans laquelle une unité est appropriée pour une certaine forme d'utilisation. Des cours spéciaux d'évaluation de la ressource terre sont données à l'Université Agricole de Wageningen au Pays-Bas ((Driessen & Konijn, 1992).

Evaluation qualitative de la ressource terre.

Des caractéristiques importantes du sol sont : la topographie, la nature pierreuse, la texture et l'acidité. Les facteurs importants du climat sont la température, la longueur du jour et la précipitation. Les formes d'utilisation de la ressource terre peuvent être caractérisées en général par ses buts généraux : p. ex. agriculture, nature, paysage et récréation. Si l'on met l'accent sur l'agriculture, les spéculations sont cultivées et le degré de mécanisation utilisé pour les cultiver déterminent les exigences pour le sol et le climat. Différents groupes de culture avec des exigences différentes peuvent être distingués. Des cultures pérennes et des cultures annuelles peuvent être distinguées. A l'intérieur des cultures annuelles, généralement les exigences que le sol doit satisfaire baisse des tubercules aux céréales et finalement aux herbes. Les exigences que le climat doit satisfaire diffère surtout entre les espèces C₃ et C₄, par exemple le blé et le riz versus maïs, mil et sorgho. Le degré de mécanisation a ses exigences sur le sol et le climat. Dans les études exploratoires sur l'utilisation de terre les techniques de production avec plusieurs degrés de mécanisation doivent être inclus pour montrer les conséquences de la mécanisation. Ceci est particulièrement clair pour les pays en voie de développement dans lesquels la mécanisation n'est pas encore chose commune., mais dans les pays industrialisés plusieurs voies de contrôle de mauvaises herbes sont possibles : chimiques, mécanique et avec labour manuel.

Une question importante est l'échelle d'évaluation de la ressource terre. Habituellement cette échelle est déterminée par le niveau de détail de la carte des sols et des données climatiques, les sous-régions administratives dans lesquelles l'étude doit être réalisée et les arguments pragmatiques. La figure 4.2 illustre qu'il est important d'agréger ou de calculer la moyenne aussi tard que possible : Calculer d'abord, faire la moyenne après.

Evaluation quantitative de la ressource terre.

Pour des superficies appropriées pour une forme spécifique d'utilisation de terre comme la culture, le potentiel et la production limitée par l'eau peuvent être calculés (voir [Chapitre 4.3](#)) en utilisant des modèles de simulation de la croissance végétale. Ce type de modèle, utilisé pour ce but, doit être simple sans trop de détails. Idéalement, ils exigent seulement quelques paramètres importants du sol, du climat et des caractéristiques de la culture.

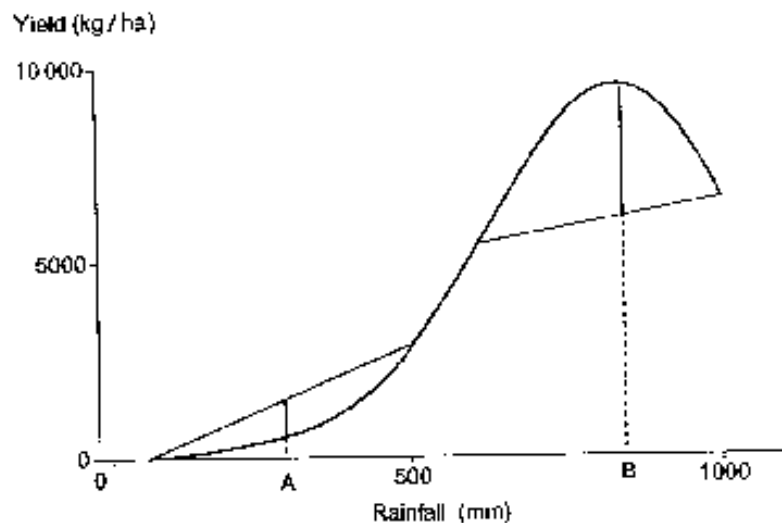


Figure 4.2. Influence des précipitations (Rainfall) sur le rendement (Yield) calculé. Le rendement est sous-estimé en faisant la moyenne des précipitations basses de la région (A) et surestimé en faisant la moyenne des précipitations élevées de la région (B) (De Wit & Van Keulen, 1987).

4.3. Quantifier des relations intrants/extrants : concepts et définitions

4.3.1. Introduction

Dans les études sur l'utilisation de la ressource terre utilisant la technique de programmation linéaire, l'information sur l'utilisation de la ressource terre est traduite en relations intrants/extrants. L'agriculture peut être définie comme une activité humaine dans laquelle l'énergie du soleil est fixée, en utilisant d'autres intrants aussi bien que possible. Cette activité donne des extrants désirables, p.ex. des graines et inévitablement des extrants indésirables comme les émissions dégagement d'azote.

Les relations intrants/extrants peuvent être considérées à travers la question « Qu'est-ce qui est possible ? » En répondant à cette question les possibilités biophysiques sont identifiées qui peuvent être écourtées par les facteurs socio-économiques, agronomiques, et environnementaux. Les possibilités de faire une certaine culture et la production correspondante sont déterminées par les facteurs biophysiques tels que le climat, le sol et les processus écologiques de la production. A la recherche de la question centrale « Qu'est ce qui se passe ? » la situation actuelle est décrite et caractérisée. Ces analyses visent la façon actuelle dont les intrants/extrants sont déterminés par production écologique, les facteurs socio-économiques et environnementaux.

Dans des études exploratoires les relations intrants/extrants doivent être définies à travers la question « Qu'est-ce qui est possible ? ». Pour une bonne quantification systématique des relations intrants/extrants, une terminologie générale et quelques concepts sont importants.

4.3.2. L'approche du cible

Les intrants peuvent être classifiés de plusieurs façons : Une classification importante dans le domaine de la production écologique est celle entre des intrants échangeables et non échangeables. Des intrants non échangeables comme l'eau et les nutriments sont pris par la plante et quelques fois incorporés (nutriments). Ils jouent un rôle spécifique et essentiel ; il n'y a pas de substitution possible entre ces intrants. Les intrants échangeables ne sont pas incorporés dans la plante.

Ils peuvent se remplacer entre eux jusqu'à un certain degré. La main-d'oeuvre, la mécanisation et les pesticides en sont des exemples.

Les extrants peuvent être subdivisés en extrants désirables (la production de culture et ses parties) et en extrants indésirables pour l'environnement, les émissions telles que les dégagement de nutriments et de pesticides ou l'épuisement des nutriments du sol. Intrants et extrants sont exprimés en termes physiques. L'utilisation des intrants peut être exprimée en unité de superficie, ou en unité d'extrant désiré. Les émissions peuvent être aussi exprimées en unité d'extrant désiré et par unité de superficie.

Comme a été dit, les intrants peuvent être utilisés pour produire des extrants de différentes manières. Cependant, les intrants ne sont pas utilisés sans aucune intention, mais bien avec un but spécifique en relation avec un extrant désiré mais aussi en rapport avec certains facteurs tels que le risque et l'incertitude. L'ajustement des intrants au extrants désirés est une approche intéressante dans l'analyse de la production écologique des relations intrants/extrants qu'on appelle approche du `Cible'. Dans la définition des intrants/extrants, la connaissance des processus impliqués est utilisée. Le potentiel d'extrants dépend des caractéristiques de la culture et des circonstances dans lesquelles la culture est réalisée, notamment la température et la radiation. En visant un extrant spécifique la quantité d'eau et de nutriments peut être quantifiée, en utilisant les connaissances concernant l'utilisation des ressources. Postérieurement, l'exigence de protection de la culture pour la réalisation des extrants est quantifiée.

Dans l'approche du `Cible', une information complète est supposé, c'est à dire, les extrants qu'on peut réaliser et les exigences en intrants sont connus à priori ; les facteurs tels que le risque et l'incertitude (p. ex. dus aux conditions climatiques) sont ignore. Davantage, on suppose en recherche exploratoire qu'on utilise pas de l'eau, des nutriments ou des pesticides plus que nécessaire, selon les techniques et connaissances disponibles.

4.3.3. Niveau de production, situation de production, technique de production et orientation de production

Les relations intrants/extrants selon les principes de l'écologie de production peuvent être caractérisées par les termes : niveau de production, situation de production, technique de production et orientation de la production. Le niveau de production vise la production d'extrants désirés par unité de superficie. Dans l'écologie de production on distingue plusieurs niveaux de production selon les trois groupes de facteurs qui déterminent la production : Définissant la croissance, limitant la croissance et réduisant la croissance (figure 4.3). Les facteurs définissant la production incluent des facteurs, qui avec un approvisionnement optimal de tous les intrants, déterminent la croissance et la production du point de vue de la plante : concentration en CO₂, radiation, température, cultures et caractéristiques des variétés. Les facteurs limitant la croissance comprennent l'eau et les nutriments pris et (partiellement) incorporés par la plante. Les facteurs qui réduisent la croissance incluent les mauvaises herbes, les maladies, les pestes et la pollution. Les nombreux intrants utilisés dans la culture d'une plante, affectent la production à travers de ces facteurs de production..

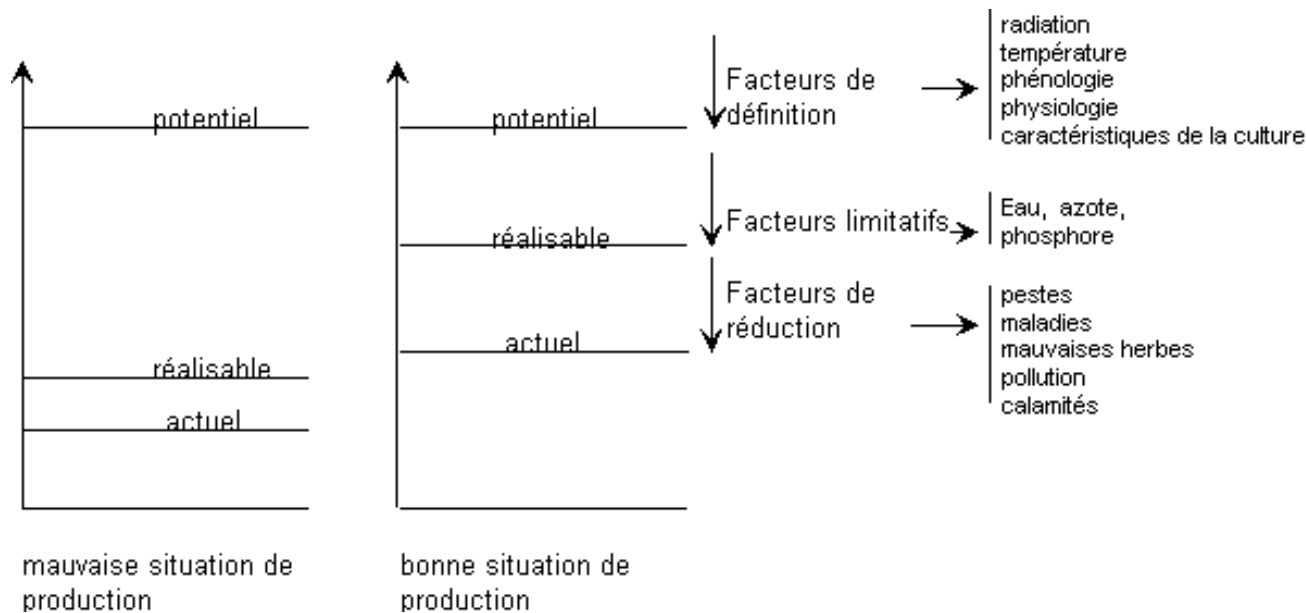


Figure 4.3. Situation de production, niveaux de production et principaux facteurs de croissance associés (Rabbinge et al., 1994).

Les trois niveaux de production qu'on peut distinguer avec ces trois groupes de facteurs de production sont (i) le niveau de production potentiel, (ii) le niveau de production réalisable (l'eau et les nutriments limitent les niveaux de production) et (iii) le niveau de production actuel. Le niveau de production potentiel est dicté par les facteurs définissant la croissance ; la plante est optimalement approvisionnée en eau et en nutriments et est complètement protégée contre les facteurs limitant ou réduisant la croissance. Au niveau de la production réalisable, la production est basse dû à un manque d'eau et de nutriments. Le niveau de la production actuelle est déterminé par le manque d'eau, de nutriments et d'une protection incomplète contre les facteurs réduisant la croissance. Pratiquement il y a plusieurs niveaux de production limités par l'eau et les nutriments et les niveaux de production actuelle à un niveau de production potentiel, dépendent du degré de manque d'eau et de nutriments et du degré de dommage causé par les facteurs réduisant la croissance.

Une relation intrants/extrants varie avec la location. La situation peut être caractérisée par sa situation de production, c'est à dire, les conditions sous lesquelles une activité de culture est réalisée et qui sont plus ou moins données pour cette activité de culture. Ces conditions sont dures à manipuler et elles affectent le niveau de production potentiel et/ou les exigences en intrants pour réaliser un certain niveau de production. Vice versa, l'activité n'affecte guère la situation de production. La situation de production inclut les facteurs suivants :

- i) le climat, spécialement la température, la radiation et l'humidité ;
- ii) les caractéristiques du sol qui affectent l'efficacité de l'utilisation des intrants non échangeables, l'eau et les nutriments (tels que la courbe pF, la fraction d'argile, la texture, le pH et la concentration organique de C) ;
- iii) les facteurs biotiques dans le sol et l'environnement fortement affectés par les activités de culture elles-mêmes (p.ex. « pression » des insectes et des maladies).

Les réservoirs en eau et en nutriments dans le sol disponibles pour la culture ne sont pas inclus dans la situation de production. Ces réservoirs peuvent être facilement manipulés par l'application d'intrants. Si deux situations de production diffèrent seulement par les caractéristiques du sol ou les facteurs biotiques, les niveaux de production potentiels de ces deux situations de production ne diffèrent pas. Cependant avec les mêmes niveaux d'intrants les niveaux de production réalisables et actuels seront plus élevés dans une bonne situation de production que dans une mauvaise situation de production. Si les facteurs climatiques aussi

diffèrent entre les deux, les niveaux de production potentiels seront également différents. ([figure 4.3](#)).

Une technique de production décrit complètement l'utilisation des intrants non échangeables et échangeables pour réaliser un certain niveau de production dans une certaine situation de production. Parce que certains intrants sont échangeables (p.ex. main-d'oeuvre, mécanisation, ou pesticides) un certain niveau de production dans une situation de production particulière peut être atteint avec diverses techniques de production.

Une activité de production (ou relation intrants/extrants) est la caractérisation d'une culture ou d'un système de culture par ses intrants et ses extrants. La même technique de production employée dans deux situations de production différentes donne des extrants différents et donne aussi deux activités de production différentes.

Avec les concepts antérieurs et l'approche du 'Cible' il est toujours possible de définir plusieurs relations intrants/extrants pour chaque situation de production. Nous avons besoin du concept orientation de la production, qui dénote le but de l'activité de production et qui oriente la quantification d'une relation intrants/extrants particulière.. Les buts de activités de production pourraient être : une haute productivité du sol, une utilisation efficace des ressources, des émissions basses par unité de produit, des émissions basses par unité de superficie, pas d'intrants externes, etc.

4.3.4. Niveau d'agrégation, horizon temporel et relations intrants/extrants

Les relations intrants/extrants sont dérivées pour le niveau culture ou le système de culture. Pour des études au niveau régional, le rôle de la ferme et du paysan lui-même sont négligés ; les facteurs de production comme la superficie, la main-d'oeuvre et la mécanisation sont supposés d'être variables. Pour des études au niveau paysan le rôle du paysan et le paysan lui-même sont explicitement pris en compte. Les hypothèses sur la superficie du paysan, la disponibilité en main-d'oeuvre et la mécanisation dépendent de l'horizon temporel. L'horizon temporel d'une étude exploratoire doit être reflété dans l'horizon temporel des relations intrants/extrants. Les relations intrants/extrants dans les modèles statiques comme la programmation linéaire doivent être définies de telle façon qu'elles puissent tenir pour plusieurs années ou cycles de rotation de culture. Ce qui implique que la base des ressources ne doivent pas changer comme un résultat d'une activité, en moins que cela ne soit explicitement souhaité, comme par exemple pour les sols saturés en P. La situation de production doit être maintenue, p. ex. l'application du labour du sol pour maintenir ou améliorer la structure du sol.

4.3.5. Quantification des intrants non échangeables

En se basant sur la qualité de l'eau utilisée par la plante pour produire un kg de matière sèche (coefficient de transpiration) à certaines niveaux de température, de radiation et d'humidité, l'eau consommée pour un certain niveau de production peut être quantifiée (Van Keulen & Van Laar, 1986). Parce que chacun des nutriments a une fonction spécifique dans la plante, les nutriments ne peuvent pas être substitués mutuellement et leurs concentrations sont plus ou moins fixées. De cette façon les nutriments consommés pour atteindre un niveau de production donné peuvent être aussi calculés (Van Keulen, 1986 ; Driessen, 1986).

Ce n'est pas la totalité des intrants non échangeables disponibles dans le sol que la plante consomme. La différence entre approvisionnement en eau ou en nutriments et la consommation de ces différents intrants, ou en d'autres termes, l'efficacité de consommation de ces différents intrants dépend du (i) niveau des autres intrants (et aussi le niveau de production), à cause de l'interaction entre les différents intrants (De Wit, 1992), et (ii) la situation de production et spécifiquement les caractéristiques physiques et biologiques du sol. Le niveau des autres intrants (i) est manipulé pour réaliser un certain niveau de production, Un ajustement approprié des intrants a un aspect positif sur la consommation d'eau et de nutriments. Une culture qui est protégée de façon optimale contre les insectes et les maladies utilisera plus efficacement l'eau et les nutriments. Dans une situation de production favorable (p.ex. courbe de pF ou pH favorable), l'eau et les nutriments sont plus efficacement utilisés et moins d'intrants sont nécessaires pour réaliser une certaine consommation et un certain niveau de production que dans une situation de production défavorable (ii).

Les réservoirs d'eau et de nutriments dans le sol sont souvent insuffisants pour réaliser une consommation qui remplit entièrement les exigences pour un niveau de production désiré. Les réservoirs en eau et en nutriments doivent, par conséquent, être complétés par l'eau d'irrigation et les extrants extérieurs (p.ex. engrais chimiques). Les intrants de l'extérieur peuvent être utilisés de différentes manières. Les nutriments peuvent être fournis en forme organique et inorganique. La fréquence d'application peut être différente : une application en début de saison ou des applications fractionnées sur toute la saison. Finalement une distribution spatiale d'emploi des intrants est importante : la volée ou une application en ligne. La façon dont on rencontre les exigences des cultures affecte aussi l'efficacité de l'utilisation et ainsi les niveaux d'intrants nécessaires. En recherche exploratoire on suppose qu'on utilise pas plus d'intrants que nécessaire selon les techniques disponibles. Des techniques efficaces et économiques sont donc employées.

4.3.6. Quantification des intrants échangeables

Après les intrants non échangeables, les intrants échangeables sont aussi nécessaires pour atteindre un certain niveau de production. La culture doit être protégée contre les mauvaises herbes, les insectes, les maladies par des techniques de protection et de rotation de culture. Parce qu'il importe peu à la culture comment elle est protégée, aussi longtemps qu'elle est protégée, on parle d'intrants échangeables : herbicides ou machine pour mauvaises herbes nématicides ou rotation de culture. Ce ne sont pas tous les pesticides, cependant, qui peuvent être remplacés par d'autres intrants, par exemple quelques fongicides.

Le choix des intrants échangeables dépend de l'orientation de production. Pour des buts économiques, le ratio de prix mutuel détermine le mixe optimal des intrants échangeables. En recherche exploratoire d'autres buts peuvent être importants, par exemple des buts sociaux ou écologiques. A cause de ces buts des intrants favorables d'un point de vue économique (p.ex. pesticides) peuvent être remplacés par ceux qui servent plutôt d'autres objectifs.

4.3.7. Emissions et immissions

Des extrants indésirables sont inévitables dans les activités de production. Si on suppose une situation d'équilibre dans laquelle le réservoir de nutriments disponible dans le sol ne change pas comme résultat d'une activité de culture, alors, il est clair que la différence entre les intrants en nutriments et la consommation par la culture disparaissent du système (lessivage, dénitrification, volatilisation, etc.). Il y a aussi émission quand on utilise les pesticides. Ceci est vrai pour le produit appliqué lui-même ou pour ses produits dégradés.

Avec des niveaux d'intrants similaires, dans une situation de bonne production on peut atteindre des rendements plus élevés que dans des mauvaises situations de production.. Donc, avec des niveaux d'intrants similaires par hectare, les émissions par produit unitaire et par unité de superficie sont plus bas dans une bonne situation de production que dans une mauvaise situation de production.

A cote de l'émission, le contraire aussi existe, qu'on appelle ici l'immission. Si tous les nutriments consommés par la plante ne sont pas fournis par les intrants externes, le réservoir des nutriments du sol diminue. On ne cherche pas toujours des situations d'équilibre. Quelques fois des émissions ou immissions sont désirables. On peut par exemple souhaiter d'améliorer la fertilité du sol en augmentant le teneur en matière organique du sol. Dans le cas d'un sol saturé de phosphore l'immission est désirable

4.3.8. Fonctions de production ou paquets technologiques

Les relations entre un intrant et un extrant peuvent être représentées mathématiquement et graphiquement par une fonction de production. Le concept de fonction de production est cependant limité, car généralement plusieurs intrants varient simultanément et quelques intrants sont de nature discontinue. A cause

des interactions entre plusieurs intrants, généralement il n'est pas rationnel de considérer les relations entre un intrant et un extrant, mais de considérer des mixes d'intrants pour réaliser un certain extrant. Certains intrants ont une nature discontinue, par exemple l'utilisation des pesticides ou l'utilisation d'un certain type de machine. L'utilisation d'un tel type d'intrant ouvre les possibilités de réaliser des niveaux de production élevés avec une bonne combinaison d'autres intrants ; un bond technologique. Il est important dans une étude sur l'utilisation de terre d'inclure des paquets technologiques essentiels dans le modèle de programmation linéaire.

Tableau 4.1. Extrants et une sélection intrants pour la croissance de la betterave en 1972, 1982 and 1992, dans deux situations de production (« Centraal kleigebied » et « Veenkoloniën »)

extrants / intrants	1972	1982	1992
« Centraal kleigebied »			
rendement (t ha ⁻¹)	56	59	68
cultivar (-)	Kawepoly	Monohil	Univers
fertilisants utilisés (kg ha ⁻¹) :			
N	160	160	140
P ₂ O ₅	100	100	100
K ₂ O	80	310	145
protection : de culture pesticides (kg a.i. ha ⁻¹) :			
herbicides	10	7	7
autres	2,6	0,5	1,2
traitements (nombre) :			
pulvérisation	4	3	6
désherbage	0	1	2
« Veenkoloniën »			
rendement (t ha ⁻¹)	45	48	51
cultivar (-)	Kawepoly	Monohil	Univers
fertilisants utilisés (kg ha ⁻¹) :			
N	160	160	160
P ₂ O ₅	120	90	50
K ₂ O	200	285	200
protection de culture: pesticides (kg a.i. ha ⁻¹) :			

herbicides	13	18,5	13
autres	1	4,5	1
traitements (nombre) :			
pulvérisation	4	5	7
désherbage	0	2	3

Des exemples de bonds (et de paquets) technologues au niveau de la culture ou du système de culture peuvent être trouvés en comparant les productions et les intrants correspondants pour une certaine culture il y a des décades et pour cette culture aujourd'hui. Le tableau 4.1 donne quelques paquets technologiques de 1972, 1982 et 1992 de la culture de la betterave dans deux régions aux Pays-Bas. Les productions et une sélection d'intrants sont donnés. Dans les deux régions les productions ont augmenté, mais les taux de N n'ont pas changé ou ont baissé. Différents variétés ont été utilisés et la protection des cultures a été améliorée. Le nombre de pulvérisations a augmenté mais la quantité d'ingrédients actifs par pulvérisation a diminué. La protection chimique contre les mauvaises herbes a été partiellement remplacée par les techniques mécaniques.

Le tableau 4.1 illustre aussi la différence dans une situation de production. Dans deux régions le ratio extrant/intrant fut amélioré au cours des décades mais cela est plus vrai pour « Centraal kleigebied » que pour « Veenkoloniën ». Avec les mêmes intrants ou moins des productions plus élevées furent réalisées dans la meilleure situation de production (« Centraal kleigebied ») que dans la situation de production plus mauvaise (« Veenkoloniën »).

4.4. Identification et quantification des contraintes

Les contraintes du modèle de programmation linéaire peuvent être grossièrement classifiées en contraintes de ressources et de produits ou de demande. Les contraintes de ressources comprennent les contraintes de terre, les contraintes d'eau, les contraintes de nutriments/fumier, et les contraintes de main-d'oeuvre. La superficie et certaines contraintes d'eau sont une résultante de l'évaluation de la ressource terre. Les contraintes de produits règlent la conversion des produits de culture ou fourrages grossiers en produits industriels ou en aliments, et la conversion de l'aliment en produits animaux. Les contraintes de demande règlent la demande des produits agricoles produits dans le système qui est rapportée à différent facteurs :

- *la situation de la commerce et les vues politiques futures la-dessus (libre marché ou autarcie) ;*
- *population et croissance démographique*
- *habitudes de consommation de la population.*

Les habitudes de consommation de la population dépendent de l'augmentation réelle des revenus disponibles et de l'inflation.. Au fur et à mesure que le niveau de vie augmente, la consommation des aliments de base s'ajuste tant dans son aspect absolu qu'en termes per capita. La consommation totale des produits vivrières, cependant, continue d'augmenter à cause d'un changement de la demande vers des produits plus riches en protéines et plus chers comme la viande et le fromage.

4.5. Vues politiques et fonctions objectifs

Dans l'étape suivante de la méthodologie plusieurs vues politiques concernant les problèmes d'utilisation de terre doivent être identifiées, p.ex. des vues qui mettent l'accent sur l'autosuffisance alimentaire, le marché libre et l'emploi, la conservation de la nature ou les pertes environnementaux etc. Elles peuvent être raffinées dans des documents de stratégie des gouvernements ou des agences donateurs ou à travers des interviews avec des décideurs politiques ou des représentants d'organisations sociales.

Les vues politiques peuvent être rendues opérationnelles à l'aide des fonctions objectifs qui sont maximisées ou minimisées dans une procédure de PLIBM. Par exemple, une vue politique concernant les pertes environnementales peut être rendue opérationnelle par les fonctions objectifs « utilisation des nutriments ou pesticides par hectare ou par unité de produit » qui sont minimisés. Les objectifs doivent être quantifiables, chacun dans sa propre dimension et la quantification doit être liée à l'utilisation de la terre dans le système. Aussi les objectifs doivent être mutuellement conflictuels au moins jusqu'à un certain niveau. Si les objectifs forment des extensions les uns les autres le modèle ne peut pas générer des solutions alternatives

Toutes les vues politiques ne peuvent pas être facilement quantifiées avec des fonctions objectifs par exemple le développement de la nature ou la conservation. Ces genres de vues politiques ont de composantes fortement spatiales qui sont difficiles à introduire dans une fonction mathématique. De telles vues doivent être confrontées avec la génération de scénarios dans les diverses étapes de l'évaluation des résultats (analyse post modèle).

4.6. Programmation Linéaire Itérative à Buts Multiples

Dans les étapes précédentes de la méthodologie un modèle PLIBM est formulé. Dans cette étape suivante les coefficients techniques de la production et la demande de produits agricoles sont confrontés aux fonctions objectifs représentant les différentes vues politiques. C'est la partie interactive la plus importante de la méthodologie. Bien sûr les décideurs peuvent intervenir plus tôt dans le processus en aidant à définir le système, identifiant les techniques de production, en identifiant les vues politiques ; mais c'est particulièrement dans cette partie qu'ils sont confrontés aux conséquences des choix dans les priorités qu'ils établissent.

Premièrement, le terrain de jeu est déterminé en optimisant chacune des fonctions objectifs sans mettre (fixer) des restrictions aux autres fonctions objectifs. Ceci est appelé le tour zéro. Les valeurs pires et meilleures sont déterminées pour chacune des fonctions objectifs. La liberté de choix initiale pour chaque objectif - la différence entre sa meilleure et sa pire valeur - est de cette façon explicitement faite par l'intéressé.

A l'étape suivante l'intéressé doit choisir l'objectif avec la pire valeur qu'il considère la plus inacceptable. Il lui faut spécifier une valeur plus acceptable pour cet objectif. Après, l'intéressé est confronté aux résultats d'une nouvelle série d'optimisation et doit choisir encore un objectif qui cette fois-ci est inacceptable pour lui. La procédure continue jusqu'à ce qu'il soit satisfait du résultat.

Idéalement la procédure doit montrer les étapes décrites ci-dessus, mais ceci n'est pas suivi dans toutes les études. Dans l'étude CE, idéalement les différents groupes, organisation paysannes, organisations de conservation de la nature, etc. auraient dû être invités. Dans l'étude du Mali beaucoup plus de discussion aurait dû avoir lieu avec les autorités locales et nationales et les représentants des bailleurs de fonds, mais c'est seulement à la fin de l'étude que des efforts dans ce sens ont été faits.

Apparemment, il n'est pas facile dans des études d'utilisation de la ressource terre d'avoir des interactions avec les intéressés. Ceci peut être dû au nombre élevé d'intéressés impliqués à différents niveaux du processus de prise de décision. En outre les niveaux hiérarchiques élevés des deux études implique que plusieurs groupes travaillant à des niveaux hiérarchiques bas, sont moins intéressés. Pour eux, la méthodologie est difficile à comprendre et en plus, les logiciels de programmation linéaire ne sont pas d'usagers sympathiques. Il prend aussi beaucoup de temps pour tourner un modèle.

4.7. Génération de scénarios d'utilisation de la terre

En donnant plus ou moins de poids aux objectifs politiques par rapport à d'autres, différents scénarios peuvent être développés représentant différentes vues politiques. En développant les scénarios les « trade-offs » entre les différents buts deviennent clairs.

Dans les deux études présentés dans les chapitres 5 et 6, les chercheurs ont fait des choix pour créer des scénarios relatifs aux vues politiques au lieu de suivre une réelle procédure interactive avec les décideurs. Les intéressés à des niveaux d'intégration élevées sont des décideurs politiques. Parce que leurs visions politiques sont inscrites dans des programmes, les chercheurs exécutant les études les ont choisis et donné une importance selon la priorité que l'objectif a dans cette vue politique..

4.8. Analyse de sensibilité

Les résultats d'une analyse faites à l'aide des techniques de la PLIBM peuvent être sensible à plusieurs aspects. Dans chacune des étapes de la méthodologie on fait des choix et on utilise des 'conjectimations'. On ignore délibérément des complications. Par exemple on fait des moyennes et ainsi on élimine la variation entre les coefficient techniques dans le temps et l'espace et on néglige les aspects stochastiques, sujets que l'on ne peut traiter jusqu'à l'heure actuelle. Evidemment, une analyse de sensibilité doit être une partie intégrante des études sur l'utilisation de la ressource terre. Cependant, étant donné le nombre énorme de coefficients techniques utilisés et les choix faits dans tout le processus, l'analyse de sensibilité s'est toujours limitée à quelques aspects dans les études menées. Nous allons illustrer la nécessité de l'analyse de sensibilité à travers des exemples trouvés dans la littérature.

En définissant le système, des choix sont déjà faits concernant les aspect à inclure et les aspects à ignorer dans l'analyse. Dans les deux études, le cas du Mali et celui de la CE, un choix a été fait de étudier un seul secteur, le secteur agricole. Dans l'étude sur la 5-ème région du Mali ([Veeneklaas, 1991](#)), l'émigration a été valorise en supposant que les gens qui trouvent d'emploi dans d'autres secteurs enverront de l'argent à leurs familles. Il est intéressant d'évaluer l'effet de ne pas inclure la valorisation de l'émigration sur les résultats, car personne n'attend que ce transfert d'argent reste constant si le nombre d'émigrants augmente. Une augmentation de l'offre de main d'oeuvre dans d'autres secteurs aura certainement des répercussion sur les salaires des émigrants dans ces secteurs. Pour le cas de la CE, les effets d'une perte d'emploi seront plus limités, car l'emploi dans ce secteur est déjà bas en comparaison avec l'autres secteurs économiques.

En définissant le système, les choix sont faits sur l'unité spatiale à l'intérieur du système pour lequel l'évaluation de la ressource terre a été faite et pour lequel des coefficients spécifiques d'intrants/extrants ont été définis. Ceci implique qu'à l'intérieur de ces unités des sous-unités ou sous-régions hétérogènes sont agrégées. Un exemple des effets de l'agrégation sur les résultats de modèles d'utilisation de la ressource terre est donné par Rabbinge & Van Ittersum (1994), montrant que l'utilisation des données agrégées dans un modèle de PL donne des valeurs moins extrêmes après l'optimisation. Ils ont supposée qu'une région est divisée en quatre unités d'évaluation de terre de 1000 ha chacune. La production de blé avec une certaine technique de production dans ces unités est supposée être 8, 6, 4 et 2 t ha⁻¹ pour les unités 1, 2, 3, et 4, respectivement. L'objectif de l'optimisation est de minimiser l'utilisation de la ressource terre dans la région pour produire 10 000 t de blé. Dans la figure 4.4 l'effet de l'agrégation des unités 1 et 2 et des unités 3 et 4 est montré. Sans agrégation la superficie est 1333 ha (1000 ha dans l'unité 1 avec 8 t ha⁻¹ et 333 ha dans l'unité 2 avec 6 t ha⁻¹), alors qu'après l'agrégation la superficie minimum est 1429 ha (1429 ha dans l'unité 1 + 2 avec un rendement moyen de 7 t ha⁻¹). Cet exemple montre que le niveau d'agrégation a une effet sur les résultats de l'optimisation.

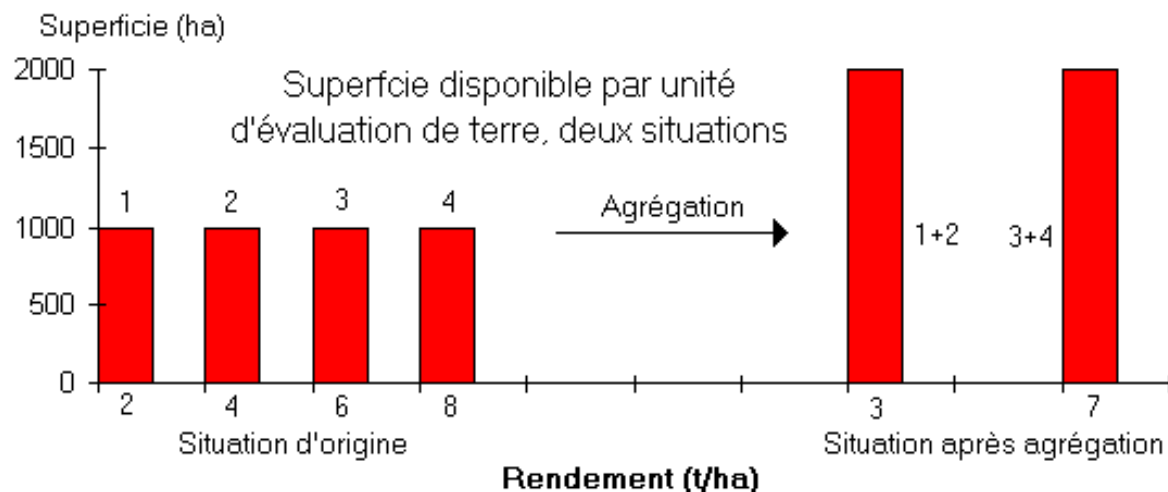


Figure 4.4 Effet de l'agrégation de quatre unités d'évaluation de la terre avec chacune 1000 ha et deux unités avec chacune 2000 ha sur la superficie agricole minimum nécessaire pour produire 10 000 t de blé dans la région (4000 ha au total) (voir texte).

Les choix de techniques de production, de produits et de vue politiques inclus dans l'étude sont extrêmement importants. La sensibilité de changement de vue politique est testée en changeant les valeurs cibles (targets) des fonctions objectifs. Si le scénario monté est réellement fait de façon interactive en étroite collaboration avec les décideurs les conséquences de l'utilisation de la ressource terre ne doivent pas surprendre. Une partie importante de nos exercices aborde ce genre d'analyse de sensibilité. Dans d'autres exercices on montre que le choix d'ajouter une ou plusieurs techniques de production n'affecte pas les résultats de manière que l'espace réalisable (Window of opportunities) soit élargi. Tout le travail sur la définition du système, les choix de techniques de production, les produits et les vue politiques, est reflété dans un modèle PL qui peut être représenté de façon simple par :

MIN/MAX ($c'x$)

soumis à :

$Ax \leq b$

Ces modèles PL sont sensibles

- aux relations intrants/extrants (coefficients techniques, les valeurs de a) ;
- aux limites physiques et normatives (les valeurs de b) ;
- aux coefficients des fonctions objectifs (les valeurs de c).

Les logiciels pour la PL donnent souvent la possibilité de faire une analyse de sensibilité standard pour une partie de ces valeurs (coûts d'opportunités, fourchette des termes indépendants, fourchettes des coefficients techniques des fonctions objectifs ; voir [Chapitre 3.2.8](#)). Cependant, en définissant les coefficients techniques, on utilise un très grand nombre de valeurs qui peuvent être critiqués. Des tests de sensibilité du modèle à des changements dans ces valeurs ne sont guère faits, et sont souvent limités à quelques valeurs comme le prix des intrants (engrais chimiques, par exemple) ou des extrants (prix des céréales). Bessembinder (sous presse) argumente que plus d'attention doit être accordée à l'incertitude d'autres coefficients comme l'efficacité d'utilisation des engrais. La sensibilité du modèle ne doit pas être testé seulement pour des changements dans les coefficients techniques mais aussi dans les changements des

restrictions supposées (termes indépendants). En estimant les coefficients techniques on utilise souvent des moyennes. Dans la pratique les valeurs varient dans l'espace et dans le temps. C'est le cas des rendements estimés sous différents régimes de précipitation. La [figure 4.2](#) montre la relation entre le rendement et la précipitation. Parce que la relation est courbiligne, les rendements sont sous-estimés dans les régions à basses pluviométries et surestimés dans les régions avec des hautes pluviométries. Pour les rendements dans l'étude du Mali, deux moyennes sont utilisées : l'une pour des années normales et l'autre pour des années sèches. Ces moyennes ont été calculées à l'aide d'un modèle de simulation en utilisant les données climatiques de 30 ans. Ensuite les deux moyennes ont été calculées. Néanmoins, dans cette approche la variation est incluse dans une mesure limitée, les aspects stochastiques sont complètement négligés. Dans la pratique la distribution ou succession de valeurs basses et élevées dans l'espace et le temps est aussi très importante. Par exemple, dans la production animale basée sur les pâturages naturelles deux années sèches subséquentes sont plus désavantageuses que deux années alternées par une année normale ou une année humide.

Dans le cas de l'hétérogénéité dans l'espace (voir exemple agrégation des unités sol) ainsi que dans le cas de l'hétérogénéité dans le temps (voir exemple avec les niveaux de production sous différents régimes pluviométriques), le credo « calculer d'abord et faire la moyenne ensuite » est valable. Hétérogénéité et courbilinearité dans les relations intrants/extrants doivent être retenues aussi longtemps que possible et leurs conséquences doivent être incluses dans la phase de l'évaluation.

4.9. Discussion général

Les stades et les étapes des études d'utilisation de la ressource terre, généralement parlant, sont montrés dans le tableau.4.2.

Tableau. 4.2. Stades et étapes des études d'analyse de l'utilisation de la ressource terre

stade	étape
1 préparation du modèle	1 détermination des buts, variables et contraintes
	2 définition du système et détermination de l'horizon temporel
	3 génération de données
2 construction du modèle	4 développement du modèle PLIBM
3 utilisation du modèle	5 construction du terrain de jeu
	6 faire les analyses de sensibilité
	7 construction de scénarios

Dans ce chapitre les aspects méthodologiques des études sur l'utilisation de la ressource terre sont discuté. Très souvent ces études laissent peu de temps pour utiliser le modèle PLIBM en interaction avec les intéressés dans le cadre de l'utilisation de la terre. Par conséquent, des résultats sont générés, cependant, l'interprétation de ces résultats et leur traduction en décision est limitée. La PLIBM devient alors PLBM. A cet égard les études AUT laissent de la place à l'amélioration, notamment dans la génération rapide et efficace de données nécessaires pour l'étude. Les études AUT ont une tendance à être très exigeants en données. Cela fait qu'il est nécessaire que les besoins en données soient exprimés explicitement aux premiers stades d'un projet AUT. Ces besoins en données doivent être prudemment évalués en considérant les objectifs de l'étude. Chaque fois qu'on fait des études AUT les questions suivantes doivent être posées :

- *Quel est le but des études AUT que l'on veut conduire ?*
- *Quelles sont les implications sur les types de données dont on aura besoin ? ; et*
- *Comment peut-on rapidement obtenir ces données et de la façon la plus efficace ?*

Seulement quand on aura donné des considérations sérieuses à ces questions, on évitera de prendre trop de temps au stade 1 de l'étude AUT et trop peu de temps au stade 3 comment il en est le cas souvent dans les études AUT.

4.10. Exercices

- 1. Donnez cinq exemples différents de système, indiquez clairement les frontières*
- 2. Indiquez la différence entre évaluation quantitative et qualitative de la terre*
- 3. Expliquez brièvement les différences entre niveau de production, situation de production, technique de production et orientation de la production.*
- 4. Pourquoi une distinction est-elle faite entre intrants échangeables et intrants non échangeables.*
- 5. Formulez au moins quatre vues politiques pour l'utilisation de terre pour votre région*
- 6. Selon les réponses à la question (5) indiquez quel type d'analyse de sensibilité vous considérez plus importante.*
- 7. Dans quelle mesure le terrain de jeu diffère-t-il d'un scénario ?*

[Chapitre 5 et 6](#)

Rapports PSS N° 30 (Chapitre 5 et 6)

Analyse de l'utilisation de terre à l'aide de la programmation linéaire à buts multiples

Manuel de cours

[Table des matières,](#)
[Chapitre 1 - 4](#)

5.1. Définition du système

Le système à analyser fut la Communauté Européenne (CE) avec 12 Etats membre l'ex-Allemagne de l'Est exclus (L'étude a commencée en 1988). Dans l'étude initiale, la CE fut divisée en 64 régions, les unités politico-administratives au niveau NUTS-1 (figure. 5.1). Les relations entre le système et le reste du monde dépendent des visions politiques considérées. Aussi bien une situation de libre échange qu'une situation d'autarcie ont été considérées. La région entière a été considérée comme une grande ferme, les effets de la différence entre la taille et le type de ferme n'ont pas été étudiés. Seules les activités qui exigent l'utilisation de terre comme un facteur de production furent considérés par région. Le porc et la volaille sont traités comme des processus industriels avec un intrant agricole. L'horticulture n'est pas prise en compte. Les cultures et l'élevage inclus dans le modèle sont ceux qui sont déjà utilisés dans la CE. Des cultures nouvelles n'ont pas été considérées. Des restrictions par suite à la présence actuelle de processus industriels, l'infrastructure ou le manque de connaissance n'ont pas été considérée, puisque dans le long terme (25 ans) il est possible que ces facteurs ne constituent plus de contraintes sérieuses. Pour toutes les régions à l'intérieur du système les possibilités de production sont définies par les caractéristiques de la culture, du sol et du climat.

[Figure 5.1](#) Unités politico- administratives au niveau NUTS-1 dans la CE.

5.2. Evaluation de la terre

Dans la première partie de l'évaluation de la terre, la partie qualitative, la carte des sols de la CE, une carte agro-climatique distinguant 109 zones et une carte avec les régions NUTS-1 (figure 5.2) sont combinées, le résultat est une carte avec environ 4200 Unités d'Evaluation de la Terre (UET's), composée chacune d'une combinaison unique d'unité sol, région climatique et région NUTS-1.

[Figure 5.2](#) Exemple d'un « revêtement » d'une carte de sol, une carte agro-climatique et une carte administrative avec des régions NUTS-1 pour une partie de l'Europe. Sur la base de ces cartes une carte d'évaluation de terre est dérivée.

Après, ces UET's sont confrontés avec les exigences de sol et de climat de trois types de culture : herbacées, céréales et tubercules. Les besoins sont définis en terme de texture, pente, drainage, profondeur des racines, salinité et température. La définition des besoins est basée sur la possibilité de labourer le sol avec des machines appropriées et les conditions minimum admises pour pratiquer des cultures. De la procédure de sélection qualitative il ressort que (une partie de) une UET est convenable ou pas pour une culture mécanisée. La figure 5.3 montre le pourcentage des superficies par pays appropriée pour l'herbe, les céréales et la production de tubercules.

Après cette partie qualitative de l'évaluation de la terre, les potentiels de production de UET's appropriés sont calculées dans les conditions limitées par l'eau et les conditions potentielles. Ceci est fait à l'aide du modèle de simulation de croissance WOFOST. Ce modèle simule la croissance, le développement et le rendement de la culture, et le bilan de l'eau dans le sol sous des conditions de temps et sol définies.

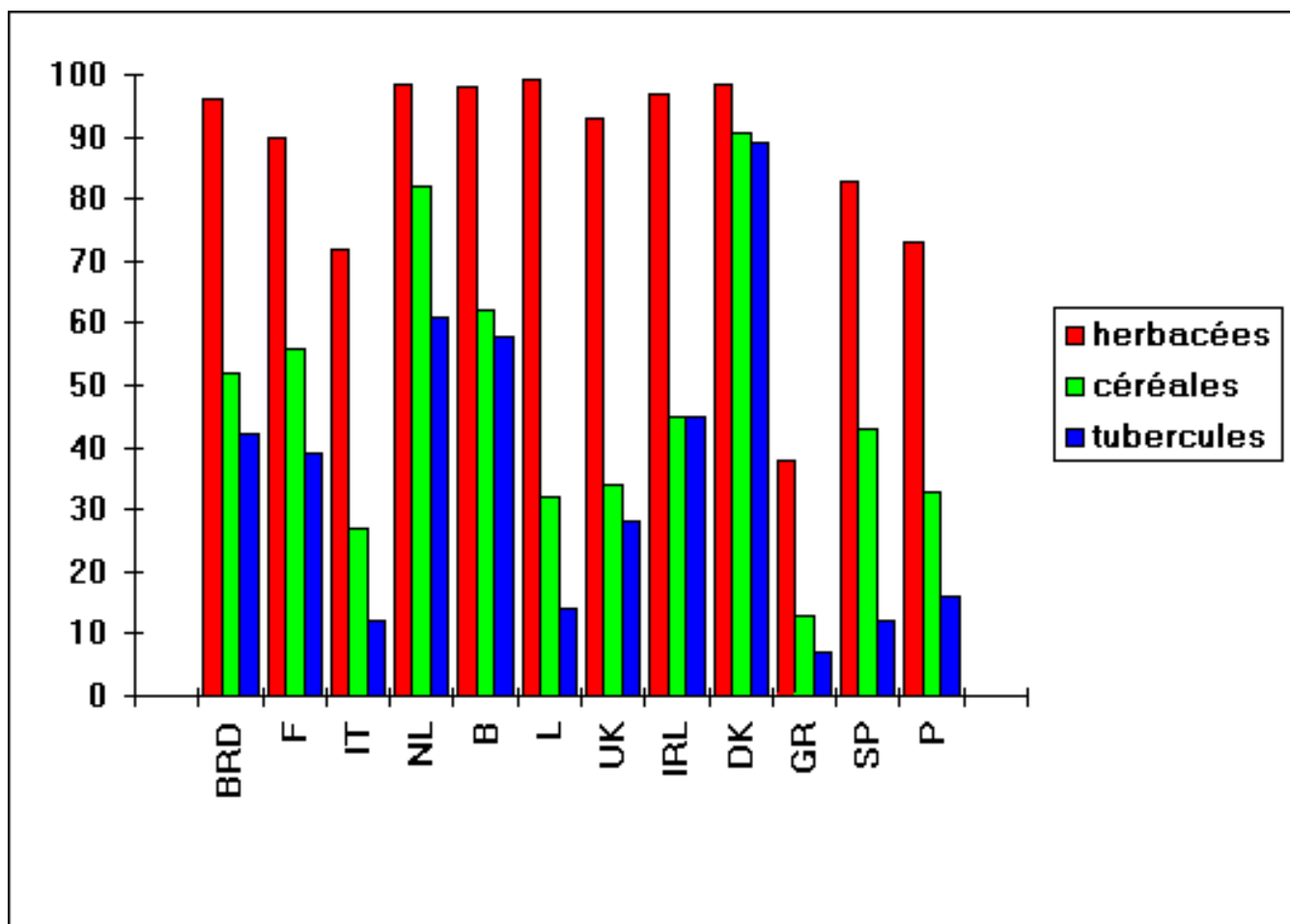


Figure 5.3 Pourcentage de la superficie agricole appropriée pour les tubercules, les céréales et les plantes herbacées.

5.3. Relations intrants/extrants

Général

Comme annoncé ci-haut, dans les études exploratoires les pratiques actuelles dans l'agriculture ne sont pas le point de départ. On doit considérer les tableaux intrants/extrants du « meilleur paysan » dans une certaine région comme le critère pour les possibilités de tous les fermiers dans la région. Cependant, ceci doit impliquer

des différences structurelles spécifiques entre région, par exemple des différences dans l'éducation ou taille des fermes, qui peuvent disparaître dans l'horizon temporel de l'étude. Dans l'étude sur les régions rurales dans la CE, les concepts de l'Ecologie de production et l'application efficace des techniques pour plusieurs ressources nécessaires pour la croissance d'une culture sont appliqués pour quantifier les activités de production dans toutes les régions de la CE. Les différences de gestion et des structures d'exploitation ne sont pas pris en compte. Ces hypothèses impliquent qu'à l'intérieur du temps formulé pour l'étude il n'y aura aucune différence dans le niveau d'éducation et la structure industrielles entre les régions dans le système. On doit juger si cela est plausible.

Dans l'étude CE 5 formes d'utilisation de la ressource terre sont incluses : cultures, pâturages, élevage, cultures permanentes comme arbres fruitiers et olives, foresterie et nature Dans le cas étudié et dans cette section une attention spéciale est donnée à la quantification des activités des cultures et aux activités de pâturages.

La littérature et les connaissances des experts ont été utilisées pour quantifier les activités de production.

Culture et pâturages

Dans l'étude de la CE toutes les relations intrants/extrants pour les cultures arables sont définies pour le niveau de système de la culture. Quelques 40 rotations de culture ont été définies en utilisant la connaissance des experts. La culture la plus exigeante dans la rotation détermine la superficie convenable pour cette rotation de culture. Trois orientations de production ont été définies pour les cultures et pour l'herbe : le rendement (R), l'environnement (E), et l'utilisation de la terre (T). Les agricultures qui en résultent sont l'AOR, l'AOE et l'AOT (AO=Agriculture avec Orientation). Pour le AOR et AOE les activités ont été définies les deux avec et sans (pluies) irrigation.

Pour la quantification des relations intrants/extrants dans AOR, les résultats de l'évaluation quantitative de la terre dérivés avec les modèles de simulations de la croissance des plantes ont été utilisés comme point de départ. Les productions simulées ont été corrigées pour les pertes de récolte et les pertes dues aux maladies dues à l'étroitesse de la rotation de culture. Les besoins en intrants pour produire les extrants ont été estimés en utilisant les connaissances des experts. Pour arriver à l'optimum économique une substitution limitée des techniques agrochimiques par le travail (main-d'oeuvre) et/ou le capital est permise.

Les activités de production dans l'AOE ont été définies à travers la littérature et les connaissances de experts. Dans ces activités l'utilisation des pesticides fut amoindrie avec un environ 70 % en moyenne. Une partie des pesticides a été remplacée par des formes mécaniques de protection de la culture, mais la diminution de l'utilisation des pesticides induit une perte de 20 % de la production. Finalement pour les activités de production des herbacées et de blé dans l'AOT ont été définies. Les pesticides ne sont pas utilisés dans ces activités et la productivité du sol est basse.

Activités d'élevage

Le bétail est nourri à l'aide des résidus de culture ou avec les fourrage grossiers (herbes, maïs fourrager). Au fond, les besoins du bétail en aliment peuvent être exprimés dans quelques composantes nutritionnelles comme l'énergie métabolisable (EM), Digestibilité de Protéines Brutes (DPB) et (pour les ruminants) dans la « matériel structurel » à cause des besoins en matières fibreuses. Ainsi dans le modèle, les valeurs nutritives des

produits et du fourrage tout comme les besoins du bétail peuvent être exprimés en EM, DCP et matériel structurel.

Nature

A côté de cette définition quantitative des activités agricoles, les locations préférées pour la conservation et le développement de la nature ont été présentées sous forme de carte. Cette information technique, basée sur un ensemble de critères, est aussi utilisée pour les scénarios.

5.4. Contraintes

A côté des contraintes de terre (superficie) et de main-d'œuvre, un ensemble de contraintes d'eau et de fumier ont été inclus dans le modèle CE. Les contraintes d'eau quantifient les limites supérieures des quantités qui peuvent être utilisées pour l'irrigation de chaque région. Ces limites supérieures ont été déterminées par les précipitations, le réservoir d'eau dans le sol et le ruissellement. Les contraintes de fumier ont aussi été définies pour chaque région. Dans cette contrainte on exige que tout le fumier produit par le troupeau dans une région est utilisé pour la production de cultures ou de fourrage dans la même région.

Les activités de traitement industriel sont également incluses dans le modèle, raison pour laquelle non seulement la demande des produits primaires comme le lait ou la betterave ont été modélisés, mais aussi celle des produits industriels tels que le fromage, le beurre et le sucre. En identifiant la demande des produits agricoles deux situations d'échange ont été distinguées, l'une avec une libre échange et l'autre avec autarcie, ainsi que deux menus, l'un selon les habitudes de consommation actuelles et l'autre avec plus de produits animaux. La croissance de la population est estimée à moins que 0,1 % par an.

5.5. Vues politiques et fonctions objectives

Dans l'étude de la CE quatre vues politiques ont été distinguées : une vue politique est focalisée sur le marché et le commerce : productivité économique et minimisation des coûts sont les caractéristiques en vigueur. La seconde vue politique vise un développement régional : maintenir l'emploi et favoriser les revenus dans le secteur agricole sont les principaux buts. La troisième vue politique donne la plus grande priorité au développement de la nature et au paysage : ici la conservation du paysage et le développement des conditions naturelles ont la plus haute priorité. La quatrième et dernière vue politique vise la protection de l'environnement : les effets négatifs de l'agriculture doivent être minimisés, ce qui est traduit par la minimisation de l'utilisation des pesticides et de la fertilisation artificielle.

Les vues politiques sont quantifiées par huit objectifs, deux objectifs agricoles, deux objectifs socio-économiques et quatre objectifs environnementaux. (tableau.5.1). Il est apparu que les objectifs relatifs à la nature et au paysage sont très difficiles à quantifier, car ces objectifs dépendent des sites ou des localisations spécifiques, faisant qu'il est difficile de définir une règle générale qui décrit de tels objectifs. C'est pourquoi des analyses ex-post ont été effectuées pour fournir des informations satisfaisant ces objectifs. Par exemple en concevant une carte concernant le développement de la nature ou la conservation et en confrontant la carte avec le scénario de la nature et du paysage.

Tableau 5.1 Objectifs incorporés dans l'étude CE (Rabbinge & Van Latesteijn, 1992).

classes d'objectifs	objectifs
agriculture	1 maximiser la productivité de la terre
	2 minimiser les coûts de la production agricole
socio-économique	3 maximiser l'emploi dans l'agriculture
	4 minimiser la baisse de l'emploi régional dans agricultural
environnemental	5 minimiser les intrants en nutriments par hectare
	6 minimiser les intrants par unité de produit
	7 minimiser les intrants en pesticides par hectare
	8 minimiser les intrants en pesticides par unité de produit

5.6. Scénarios d'utilisation de la ressource terre

Dans l'étude CE quatre scénarios ont été développés :

Scénario A : Marché libre et libre échange

Dans le scénario libre échange l'agriculture est traitée comme n'importe quelle autre activité économique. La production se fera aux coûts les plus bas que possible. Le point de départ est un marché mondial libre pour les produits agricoles avec des restrictions minimums sur les services sociaux et l'environnement. La vue politique dominante dans ce scénario, est à la vue politique des Etats Unis dans les négociations du GATT (Général Agreement on Tariffs and Trade).

Scénario B : Développement régional

Dans ce scénario l'emploi régional à l'intérieur de la CE a la plus grande priorité. La génération de revenus pour les paysans à l'intérieur du secteur agricole est d'une grande importance. La vue politique dominante dans ce scénario peut être vue comme une poursuite et une extension de la politique actuelle.

Scénario C : Nature and paysage.

Dans ce scénario la plus grande priorité est donnée au maintien de la superficie naturelle existante autant que possible. Une séparation spatiale entre l'habitat naturel et les superficies agricoles est faite. A coté des superficies strictement réservées à la conservation de la nature des superficies sont choisies pour les activités humaines. Ce scénario représente la vue politique des organisations de conservation de la nature.

Scénario D : Protection de l'environnement.

La vue politique la plus importante dans ce scénario est de prévenir les substances étrangères à pénétrer l'environnement. La différence avec le scénario antérieur est que le but principal n'est pas de préserver ou de stimuler certaines plantes ou espèces animales mais de protéger le sol, l'eau et l'air. Cela n'est pas une

séparation spatiale des superficies de la nature et des superficies agricoles mais plutôt une intégration. L'agriculture peut être pratiquée partout mais sous une stricte réglementation pour garantir la protection de l'environnement. Ce scénario représente la vue politique d'une agriculture intégrée.

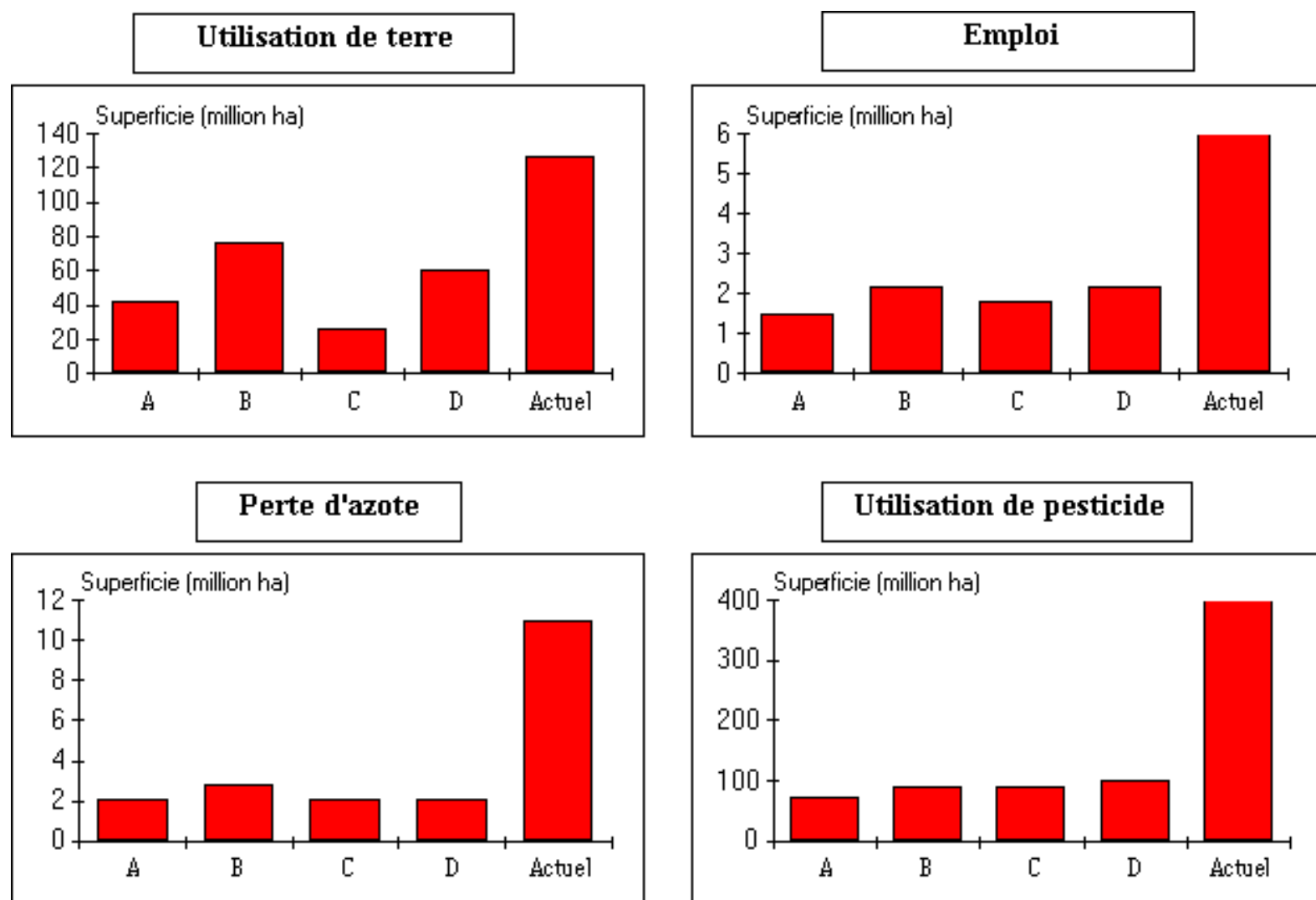


Figure 5.4. Utilisation de la terre, emploi, pertes d'azote et utilisation des pesticides dans quatre scénarios et dans la situation actuelle (Van Latesteijn & Rabbinge, 1992).

Chacun de ces quatre scénarios aboutit à une utilisation différente de la terre, de l'emploi, et à des différents pertes d'azote et utilisations des pesticides. Cependant, il y a des résultats qui sont communs aux quatre scénarios (figure 5.4)

Tous les scénarios montrent une chute drastique dans l'utilisation de la terre pour des buts agricoles. La superficie totale dans les quatre scénarios varie entre 26 et 92 millions d'hectares, alors que actuellement 130 millions d'hectares sont utilisés pour des buts agricoles (figure 5.4 a). Un autre résultat est que 1.5 à 2.9 millions hommes par an peuvent suffire pour la production totale de l'agriculture au lieu de 10 millions hommes par an qui sont employés actuellement dans la production primaire (figure 5.4 b). Les pertes d'azote et l'utilisation des pesticides peuvent être réduites considérablement. (figure 5.4 c et d). Par exemple pour les pesticides 21 à 154 millions de kg d'éléments actifs peuvent suffire au lieu de plus de 400 millions de kg actuellement.

Les cartes dérivées des résultats du modèle démontre la localisation de l'utilisation de la terre et des techniques de production sous différentes stratégies. Deux stratégies alternatives sont données comme exemples (figure 5.5). La première stratégie, Scénario A, est basée sur un marché libre et une libre échange. Les coûts de production sont minimisés. La seconde stratégie, scénario B, concerne la stimulation de l'emploi régional dans une situation d'autarcie dans la CE ; l'emploi régional est maximisé. La figure 5.5a (scénario A) et 5.5b (scénario B) montre la localisation de la production de céréales dans ces deux stratégies alternatives. Le volume de la production est similaire, mais la localisation est différente. Dans le scénario B la production est répandue à travers toute l'union afin de satisfaire l'objectif de l'emploi régional. Dans le scénario A seules les régions les plus efficaces sont utilisées pour la production. Dans la figure 5.5 c et d, la localisation des pâturages est montrée pour les deux scénarios. Ces cartes sont à interpréter ensemble avec les deux antérieurs. La localisation dans le scénario A (la figure 5.5c) montre clairement que les pâturages dans les zones près de la Méditerranée sont optimales en terme de minimisation des coûts de production, ce qui peut être un effet d'une saison de croissance longue dans les régions du Sud.

Figure 5.5 Allocation de la production des céréales (a) et des plantes herbacées (b) pour les scénarios A (en haut) et B (en bas). Les hachures indiquent le pourcentage de la superficie appropriée (UAA) par région qui est actuellement utilisé.

5.7. Exercices

- 1) Dans l'étude de la CE quatre orientations de production ont été définies. Indiquez lesquelles et argumentez pourquoi elles ont été choisies.
- 2) Pour le Mali, quelles orientations de production seraient appropriées et donnez les motifs.
- 3) Faites une interprétation des résultats de l'étude de cas de la CE.

6. Etude du projet PSS sur la zone soudano-sahélienne du Mali

Dans les pays de l'Afrique subsaharienne et dans la zone soudano-sahélienne en particulier, des contraintes agro-écologiques et socio-économiques limitent la production agricole. Ces contraintes qui ont été déjà abordées dans l'introduction générale n'ont pas jusqu'à présent de solutions appliquées à grande échelle. D'où la nécessité d'adopter des méthodologies de recherche et d'analyse non seulement sur les aspects techniques et agro-écologiques, mais aussi sur les aspects économiques.

Au sein du projet PSS la recherche système s'est fixé ainsi comme objectif d'analyser de manière intégrée le choix des différentes options techniques en fonction de la zone agro-climatique et des conditions socio-économiques. Ce choix sera analysé aussi en tenant compte de la disponibilité des ressources, des relations entre agriculture et élevage et des objectifs de développement de l'entité géographique analysée comme la durabilité. Outre la production animale, le projet a voulu tenir compte dans sa recherche système de la production végétale. Ceci doit être fait de façon intégrée, car dans la région ces deux sont aussi progressivement intégrés. Un simple analyse coûts-bénéfices ne suffit donc pas. Un autre aspect qu'on a voulu inclure dans les analyses est l'existence de plusieurs objectifs de développement qui peuvent être conflictuels.

La méthodologie choisie pour faire une telle analyse, est la programmation linéaire à buts multiples (PLBM). Pour pouvoir appliquer cette méthodologie il est nécessaire de quantifier les ressources pour l'entité géographique considérée, de définir et de décrire quantitativement les rapports intrants/extrants des options techniques de production de cultures, d'élevage, de sylviculture et de l'exploitation des pâturages. L'environnement économique (prix des intrants et des extrants) et les objectifs de développement doivent être aussi spécifiés. La description des ressources est présentée dans la [section 6.2](#), et, de façon plus détaillée dans Sissoko *et al.*, (1996). La [section 6.3](#) décrit la méthodologie de définition des options techniques, et contient une explication du calcul des intrants et des extrants pour les différentes activités de production végétale et animale. Pour plus de détails sur cette question se référer aux rapports de recherche du projet PSS (Quak *et al.*, 1996 et [Bakker *et al.*, 1996](#)).

Dans la [section 6.4](#) les contraintes incluses dans le modèle PLBM sont présentées. Dans la [section 6.5](#) les objectifs de développement considérés et le choix des prix sont présentés.

La méthodologie de la PLBM utilise un modèle qui joue un rôle dans la prospection et l'analyse des possibilités d'une production agricole durable (figure 6.1). Il incorpore d'abord la connaissance existante à différents niveaux : la disponibilité des ressources, les possibilités de production (ou options techniques de production), les objectifs visés par les décideurs de l'entité considérée (grande ou petite région, UPA) et les conditions économiques (prix). Sur la base de ces connaissances il calcule la solution optimale qui est dégagée pour une série de combinaisons des prix et des niveaux cibles des différents objectifs. Cette solution optimale contient la valeur de la fonction objectif et donne aussi la valeur de toutes les variables incluses dans le modèle. Les coûts d'opportunité de l'utilisation des différentes ressources et des produits finaux et intermédiaires ainsi que le mode d'allocation des ressources sont aussi donnés dans la solution finale. Les résultats qui sortent de cette solution optimale peuvent être analysés et ensuite comparés avec la situation actuelle pour pouvoir élaborer des recommandations aux politiciens et chercheurs sur la façon d'atteindre ou de rapprocher cette situation optimale à partir de la situation actuelle.

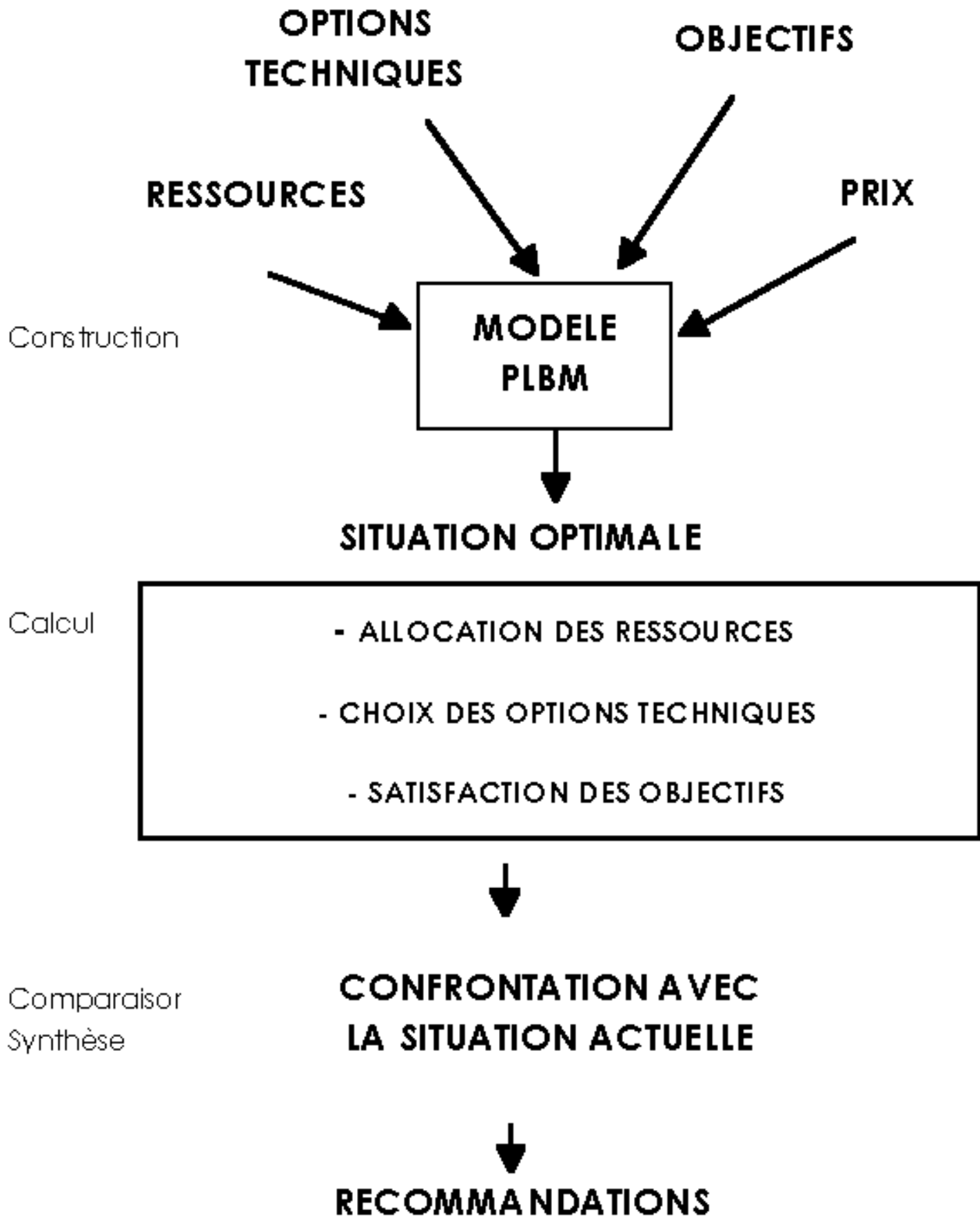


Figure 6.1. Phases de la modélisation PLBM.

6.1. La définition du système

Un système de production peut être schématisé selon la figure 6.2. Cette figure montre qu'à l'aide d'une base de ressources des produits finaux sont produits. Ces produits finaux sont des produits qui ont une certaine valeur, parce qu'ils peuvent être consommés ou vendus. Il y a plusieurs manières d'utiliser les ressources pour atteindre des différentes productions. Dans le langage de la programmation linéaire ces manières de production, ou options techniques, décrites de façon quantitative, sont appelés des «activités». Une activité utilise des intrants pour produire des extrants. Les extrants ne sont pas seulement des produits finaux mais peuvent aussi être des produits intermédiaires, qui n'ont pas une valeur directe pour la consommation ou la vente, mais peuvent être utilisés pour d'autres activités.

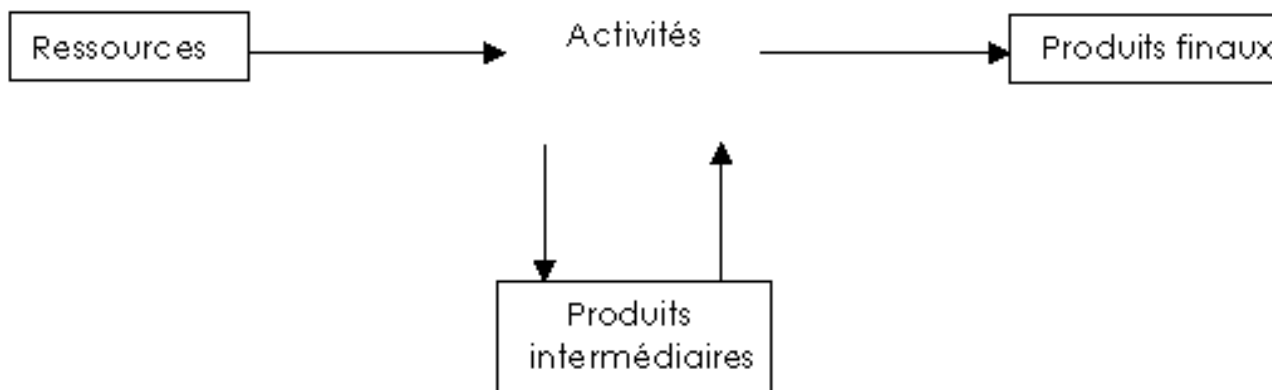
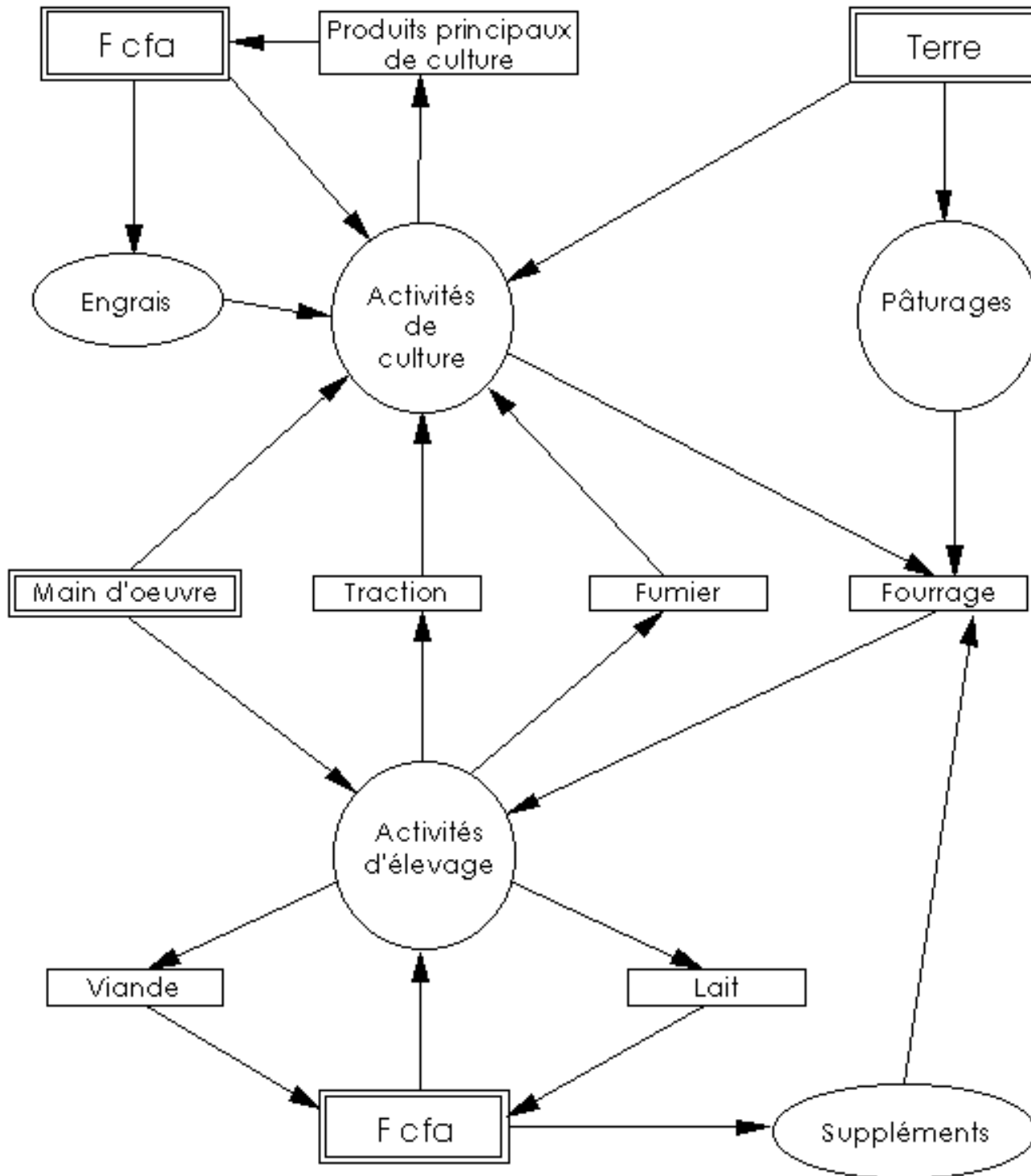


Figure 6.2 Le processus de production des activités

Les trois types d'activité principaux sont les activités de culture (y compris la sylviculture), les activités d'élevage et l'exploitation des pâturages. Une vue globale de ces types d'activité et leur interrelations dans le modèle PLBM est présentée dans la figure 6.2. Dans les activités de culture (et de sylviculture), des ressources (terre, main d'oeuvre, capital) et d'autres intrants (engrais, fumier et boeufs de labour) sont utilisés pour produire les produits principaux de culture (mil, sorgho, coton, etc., mais aussi le bois) et des produits secondaires (feuilles, tiges, fanes) qui sont utilisable en élevage comme fourrage. Ces produits secondaires ou résidus peuvent aussi être utilisés d'autres façons (enfouissement, brûlage, litière), comme il est illustré dans la figure 4.3.1.2 dans la [section 4.3.1](#). Dans les activités d'élevage, l'utilisation de la main d'oeuvre, du capital, et des fourrages génère du lait, de la viande, du fumier et de la force de traction. Les «activités» de pâturage produisent du fourrage (et aussi du bois de chauffe) en utilisant la terre comme seul intrant. Chaque activité a sa propre combinaison de quantités différentes en intrants et extrants qui constituent la plupart des coefficients techniques du modèle. Les produits principaux des cultures et de l'élevage constituent les produits finaux qui sont valorisés à leur prix et transformés ainsi en capital-revenu.

Les produits intermédiaires principaux (figure 6.2 et figure 6.3.b) sont la matière organique et les éléments nutritifs (azote, phosphore, potasse), les fourrages, les résidus de récolte et la traction. Noter que dans la suite le terme «éléments nutritifs» peut aussi inclure la matière organique. Pour les produits intermédiaires (sauf la traction) une distinction est faite entre deux lieux d'utilisation : champ et ferme. La liaison entre les deux lieux est créée par deux types de transport : le transport de fumier (matière organique et éléments nutritifs) de la ferme vers le champ, et le transport des résidus de récolte du champ vers la ferme. Concernant le capital, qui est

une ressource selon la figure 4.1.2.3, remarquer qu'il n'a pas été traité dans le modèle comme une ressource au vrai sens du mot. Dans beaucoup de scénarios on a calculé seulement le bilan monétaire, mais dans d'autres des exigences concernant le capital initial ont été formulées.



Cercle: activités
 Rectangle double:
 Rectangle simple: produit final ou intermédiaire

Figure 6.3. Diagramme relationnel des principaux composants du modèle PLBM.

6.2. Ressources de la zone soudano-sahélienne du Mali

6.2.1. Introduction

La zone d'étude du projet Production soudano-sahélienne (PSS) est la zone soudano-sahélienne du Mali comprise entre les isohyètes de 300 mm et 900 mm an⁻¹, avec une superficie totale de 4,56 millions de km² avec une population totale d'environ 5,1 million habitants, soit près de 70 % de la population malienne. Pour tenir compte de la diversité en possibilités de production agricole dans cette zone, elle a été découpée en unités plus homogènes dénommées sous-zones. La méthodologie de découpage en sous-zones est décrit dans la [section 6.2.2](#). Une description des ressources par sous-zone est donnée dans la section 4.2.1.3. Et la section 4.2.2 contient quant à elle la description des ressources et de l'environnement socio-économique et institutionnel du cercle de Koutiala.

6.2.2. Les sous-zones et les unités agro-écologiques

Comme abordé dans le chapitre 4.1.4 l'un des objectifs de recherche de l'Equipe Modélisation des Systèmes (EMS) est d'explorer et d'analyser les possibilités d'une agriculture durable en zone soudano-sahélienne. La zone est vaste et il y a de grandes variations en climat (pluviométrie), en sols, et en densité démographique. Tous ces paramètres ainsi cités influencent fortement les possibilités de production. C'est pourquoi la zone n'est pas traitée comme une entité mais plutôt subdivisée en unités plus homogènes.

Tableau 6.1 Répartition de la zone soudano-sahélienne en sous-zones par région administrative et zone pluviométrique.

pluviométrie (mm/an)	Kayes	Koulikoro	Ségou	Mopti	Koutiala Yorosso	Tombouctou Ouest	Tombouctou Est + Gao
100							
200						3.0	3.1
300							3.2
400		2.1		3.3			
500	1.1	2.2					
600	1.2	2.3	3.5	3.4			
700	1.3	2.4	3.6				
800					3.7		

La subdivision au niveau le plus élevé est celle en sous-zones, dont il y en a 15. Le critère principal utilisé pour le sous-zonage est la pluviométrie. Un sous-zonage basé uniquement sur la pluviométrie mène à des très longues bandes horizontales orientées d'Ouest en Est qui traversent les différentes régions administratives du Mali. Pour limiter la taille des sous-zones, et pour ainsi arriver à des sous-zones plus petites et plus homogènes en ce qui concerne la densité démographique, ces longues bandes ont été subdivisées en utilisant des limites dans la direction Nord-Sud. Pour ces limites on a utilisé autant que possible des limites administratives.

Comme beaucoup de données statistiques sont trouvées au niveau des régions administratives,

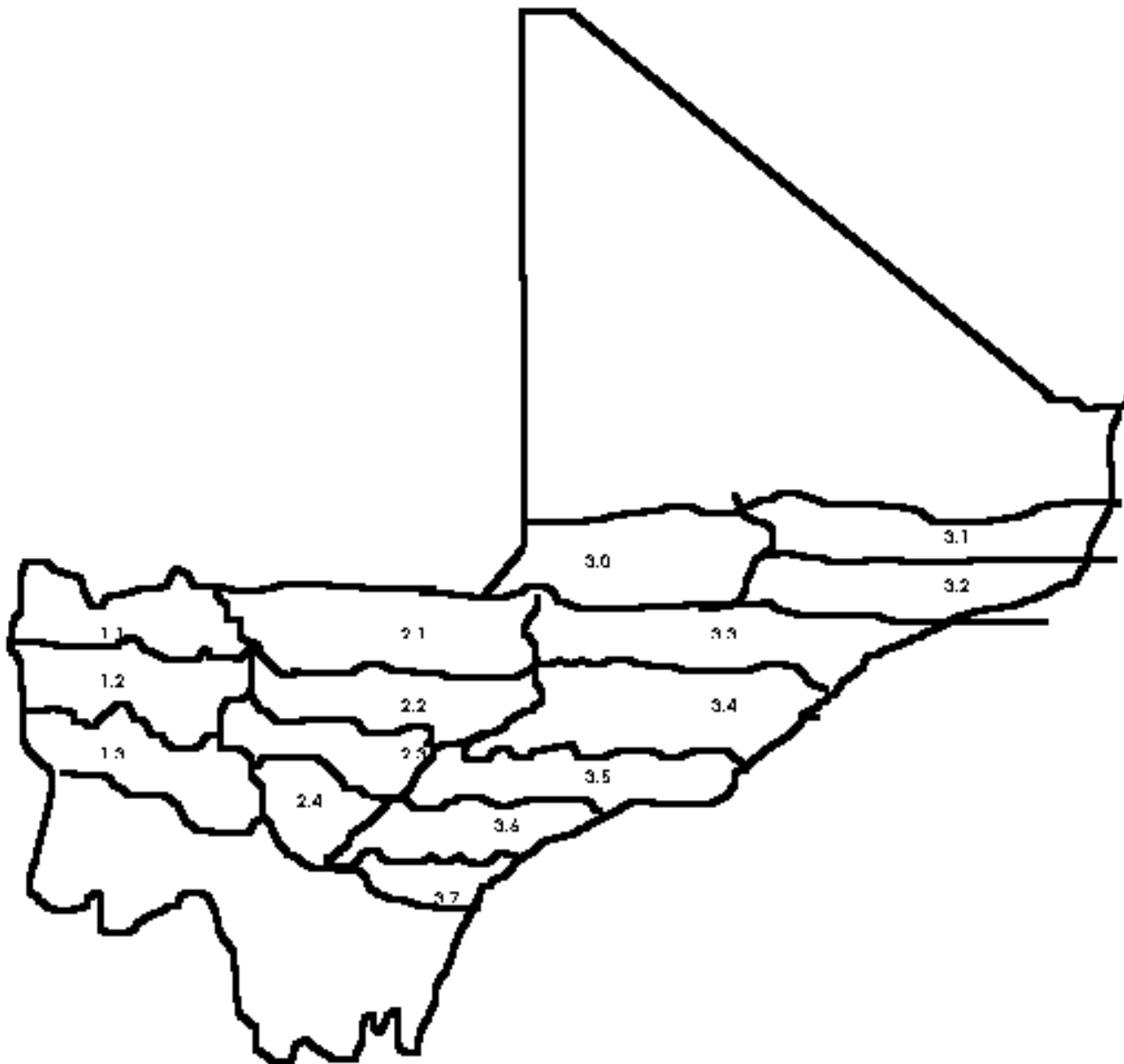


Figure 6.4. Esquisse du Mali avec le sous-zonage. Le zonage du projet PSS pour la zone soudano-sahélienne au Mali

La figure 6.4 et le tableau 6.1 présentent la délimitation des différentes sous-zones dans la zone d'étude. Les sous-zones sont distingués à l'aide d'un code, qui est composé de deux chiffres. Le premier chiffre indique la localisation (1 : Ouest, 2 : Central, 3 : Est), le deuxième chiffre indique le numéro du rang allant du Nord au Sud. Par sa localisation spéciale la sous-zone 3.0 fait une exception par rapport aux sous-zones 3.1 et 3.2. Dans le tableau 6.1 la pluviométrie annuelle, qui augmente en allant du nord vers le sud, est aussi indiquée, soit de manière crue.

Tableau 6.2 Répartition (%) des superficies des sous-zones sur les régions administratives ; superficies en 100 km²

régions	sous-zone															super-ficie
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	dans zone
Kayes	99	98	97	2	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	777
Koulikoro	1	2	3	64	54	67	96	0	0	0	0	0	0	4	2	545
Tombouctou	0	0	0	2	0	0	0	99	38	34	6	0	0	0	0	834
Gao	0	0	0	0	0	0	0	0	62	63	0	0	0	0	0	877
Mopti	0	0	0	0	7	0	0	1	0	3	92	92	28	0	0	777
Ségou	0	0	0	32	34	30	4	0	0	0	2	8	72	93	6	609
Sikasso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	92	142
superficie	242	257	274	214	202	215	136	311	633	766	372	356	239	194	148	4559
% du total	5,3	5,6	6,0	4,7	4,4	4,7	3,0	6,8	13,9	16,8	8,2	7,8	5,2	6,3	3,2	100

Le tableau 6.2 contient les données en superficies des sous-zones et la répartition de ces superficies sur les régions administratives.

6.2.3. Les ressources par sous-zone

Dans cette section les ressources de chacune des 15 sous-zones sont décrites, après laquelle les sous-zones sont caractérisées. Tout d'abord une caractérisation des types de sol distingués est présentée. Ensuite les ressources suivantes sont décrites : les superficies par type de sol, la population et la disponibilité en main d'oeuvre, les ressources ligneuses, les effectifs animaux et les ressources en eau. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.3. Dans ce tableau la pluviométrie moyenne par sous-zone est aussi donnée. Les superficies, la population, la disponibilité en main d'oeuvre et la disponibilité en eau sont des données utilisées dans le modèle PLBM. Certains types de données, notamment celles sur le bétail et sur la production de bois ne le sont pas, mais servent plutôt à faire une comparaison des résultats obtenus avec la situation actuelle.

Typologie des sols et les superficies par sous-zone

La plupart des sols du Mali ont été déjà inventoriés par le Projet Inventaire de Ressources Terrestres (PIRT) et la description des types de sols dans la zone d'étude est largement basée sur les trois principaux documents de ce projet PIRT à savoir : l'atlas, le rapport technique et les annexes (PIRT, 1983a, b, c). Cependant, la partie Nord-Est de la zone n'était pas comprise dans l'inventaire du PIRT. Pour cette partie la Carte Mondiale des Sols de la FAO/UNESCO (FAO/Unesco, 1973) a été utilisée.

Dans la classification du PIRT 68 unités sol/végétation ont été distinguées. Pour l'objectif visé dans cette étude, un niveau de détail comme celui du PIRT n'est pas utile, car beaucoup de caractéristiques qui sont à la base de cette distinction ne sont pas stables. Dans l'exploration des possibilités des systèmes de production agricoles

durables, il est mieux de se baser sur les caractéristiques stables. Les caractéristiques utilisées sont : la texture, la profondeur, la présence de gravillons et l'aptitude d'être inondé, qui déterminent dans une grande mesure la disponibilité en eau d'un sol pour la culture.

A l'aide de ces caractéristiques les 68 unités sol/végétation PIRT ont été regroupées en 16 types de sols (PSS) qui peuvent porter une végétation, et deux autres substrats qui ne portent pas de végétation (roches ou erg et surfaces d'eau). Les principaux types de sols distingués sont les suivants.

Les *sols d'écoulement (EC)* sont des types de sols qui peuvent être inondés. Ils correspondent aux quelques « terrains inondés »(TI) et « terrains hydromorphes » du PIRT.

Sols superficiels : Les sols peu profonds dits superficiels font partie des terrains rocheux (« TR ») du PIRT. Ils se distinguent des sols gravillonnaires, qui sont aussi superficiels par l'absence de gravillons. Le code-PSS est « SU ». Le substrat SU contient les TR-5 et TR-6. Le TR-3 est mis dans une sous-classe parce que ce substrat est fortement incliné. Le code-PSS pour ce substrat est « SU-inc ».

Sols gravillonnaires : Les sols contenant assez de gravillons appartiennent aux substrats « TC » (terrains sur cuirasse) et « TR » du PIRT. Une distinction entre ces sols profonds est faite en fonction de la profondeur. Alors il y a des sols gravillonnaires superficiels « GR » (profondeur moyenne : 44 cm) et très superficiels « GR_su » (profondeur moyenne : 18 cm). Les autres types de sols qui n'ont pas les caractéristiques spéciales comme ces 3 premiers types sont classifiés selon leur texture. Les classes retenues sont : sable (SA), sable limoneux (SALI), limon sableux (LISA), limon (LI) et limon argileux (LIAR).

Sables : Les sols sableux sont composés de dunes mortes avec une texture sableuse grossière.

Sables limoneux : Les sables limoneux font également partie des dunes mortes, mais leurs textures sont plus fines.

Limons sableux : Les limons sableux sont les sols les plus prédominants dans la zone d'étude. Nous distinguons ainsi les sols limons sableux grossiers et fins : LISA-g et LISA-f.

Limons : Les limons forment un petit groupe que nous avons voulu séparer quand même des limons argileux, non seulement à cause de leur texture moins argileuse mais aussi sur la base de sa situation dans les toposéquences. Les limons comme définis se trouvent sur la pente et ont par conséquent un risque de ruissellement.

Limons argileux : Les limons argileux (« LIAR ») recevant l'eau de ruissellement sont composés de sols plus lourds.

Terrains inaptes et eau permanente : En plus des différents sols qui peuvent porter une végétation exploitable il y a des substrats qui ne portent rien ou trop peu pour être utile. Il s'agit des ergs, des roches nues et des surfaces d'eau permanente.

Population et main d'oeuvre

La description quantitative de la population a été faite afin d'arriver à une estimation des besoins de consommation des différents produits et de la disponibilité en main-d'oeuvre dans chacune des sous-zones. Les informations présentées sont basées sur les résultats du second Recensement Général de la Population et de l'Habitat au Mali (DNSI, 1991d), qui donne la population par arrondissement (subdivision des régions). Ensuite on a estimé pour chaque arrondissement la fraction de la superficie qui tombe dans une sous-zone donnée. En supposant une répartition des habitants proportionnelle à la superficie parmi les sous-zones, la population par sous-zone est estimée. La densité est en dérivée et est présentée aussi dans le tableau 6.3. Comme le témoigne ce tableau, les densités humaines les plus élevées se trouvent dans les sous-zones au sud ou au sud-est, c'est à dire les sous-zones 2.4, 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7.

La disponibilité en main d'oeuvre dépend de la population et de la proportion d'actifs. Cette proportion a été estimée à 55 %, en utilisant les données présentées par [Veeneklaas et al., \(1991\)](#). Pour estimer la population de la zone dans les décennies à venir, un taux de croissance de 2 % par an a été utilisé (Sissoko *et al.*, 1995).

Pluviométrie

La description de la situation pluviométrique de chacun des différentes sous-zones définies a été faite sur la base des données d'environ 40 stations pluviométriques au Mali. Ces données ont été obtenues avec la Direction Nationale de la Météorologie du Mali. Il s'agit des totaux pluviométriques quotidiens, mesurés pendant la période 1961-1990. A partir de ces données la pluviosité annuelle moyenne a été estimée pour chaque sous-zone en utilisant les données de chacune des stations pluviométriques dans la sous-zone et, dans certains cas, une ou quelques stations situées juste en dehors de la sous-zone. On observe dans le tableau le fait que la pluviosité augmente au fur et à mesure qu'on va du nord vers le sud.

Ressources en eau

En zone soudano-sahélienne du Mali, les ressources en eau sont assez diversifiées, il y a les sources d'eau naturelles : fleuves (Niger, Sénégal, Bani), rivières et mares permanentes, les puits traditionnels, les infrastructures hydrauliques modernes : pompes, puisards, forages.

Pour estimer la superficie disponible pour des activités culturales, des cartes des points d'eau traditionnels et des infrastructures hydrauliques modernes ont été établies pour étudier le niveau de disponibilité en eau dans les différentes sous-zones. Il a été supposé que la distance maximale d'un champ à un point d'eau permanent peut être 6 km (la distance à parcourir deux fois par jour par le cultivateur, voir [Veeneklaas et al., \(1991\)](#)). Ainsi un cercle de 6 km a été dessiné autour chaque point d'eau permanent. La partie non-couverte par un des cercles a ensuite été estimée. Cette partie indique la fraction des terres qui n'est pas utilisable pour la culture ou la sylviculture.

Une estimation pareille a été faite pour la fraction de terres qui n'est pas utilisable pour les pâturages en saison sèche à cause d'une maque d'eau. La limite pour ce type d'activité est 15 km d'un point d'eau permanent.

Comme le bois, l'eau sera aussi considérée comme une contrainte lorsque sa disponibilité est limitée. L'usage des sols pour l'élevage ou l'agriculture peut être compromis dans les zones où la disponibilité en eau est limitée.

Ainsi l'hypothèse est considérée selon laquelle les activités de culture ne sont pas pratiquées que dans un rayon de 6 km autour d'un point d'eau, et pendant la saison sèche les activités d'élevage ne sont possibles que dans un rayon de 15 km autour d'un point d'eau. Ainsi dans le processus de modélisation les superficies qui sont en dehors de ces rayons doivent être déduites de la superficie totale disponible pour l'agriculture et l'élevage.

Bétail

Les effectifs des cheptels par espèce et par sous-zone ont été estimés sur la base des effectifs par régionaux selon les statistiques de l'OMBEVI (1992) en supposant que la répartition d'un cheptel est proportionnelle à la superficie de une région parmi les différentes sous-zones. Les résultats, exprimé en UBT totale par sous-zone et en UBT km⁻¹, sont présentés dans le tableau 6.3. Pour le calcul du nombre d'UBT la conversion donnée par [Breman & De Ridder \(1991, page 456\)](#) est employée : 1 UBT = 1,5 bovin = 10 moutons = 12 chèvres = 2 ânes = 1 cheval = 0,8 chameau. Ce sont ces trois derniers types d'animal qui sont escomptés dans la groupe « autres » du tableau. La densité animale varie d'environ 3 à 20 UBT km⁻¹ La fraction des bovins dans la totalité, pour la plupart des sous-zones autour de 75 %, est plus basse dans les sous-zones de basse pluviométrie (3.0, 3.1, et 3.2).

Ligneux

Les ressources ligneuses de la zone soudano-sahélienne ont été estimées sur la base des données du Projet Inventaire des Ressources Ligneuses (PIRL). De la grande base des données, le tableau 6.3 présente la production de bois annuelle actuelle, c'est à dire l'accroissement annuel, estimé en m³ ha⁻¹ an⁻¹. A partir de ces données une estimation de la production en bois par habitant a été ajoutée.

Caractérisation des sous-zones Sous-zone 1.1

Elle est localisée au Nord de la région de Kayes (Nord des cercles de Nioro et de Yélimané) avec une pluviométrie moyenne de 473 mm/an et une superficie totale de 23.135 km². Elle couvre tout ou partie des zones agro-écologiques du Beredji (G1) et du Sero (G2) respectivement, situés dans la région naturelle du GUIDIMAGHA, ainsi que le Mamanan guindé, le Toronké, et 32 % du Bas Kaarta qui sont des zones agro-écologiques situées dans la région naturelle du HODH. Ce sont les sols limon-argileux (LIAR) et limon-sableux grossiers (Lisa_g) qui sont prédominants. Ils sont suivis par les sols gravillonnaires (GR) 16 % et les sols superficiels 15 %.

Sous-zone 1.2

Elle est aussi localisée dans la partie Nord de la région de Kayes (Cercles de Diéma et Kayes), avec une pluviométrie moyenne de 621 mm/an et une superficie de 24.96 km². Elle couvre la zone agro-écologique du Sero située dans la région naturelle du GUIDIMAGHA et s'étend dans la région naturelle du HODH où elle couvre les zones écologiques du Mamanan guindé, du Bas Kaarta et du Haut Kaarta occidental. Elle ne couvre qu'une petite partie (12 %) du Bélédougou situé dans la région naturelle du Plateau Mandingue. Le sol limon-argileux (LIAR) est le substrat le plus important de la sous-zone 1.2 avec 41 % de la superficie totale. Il est suivi du sol gravillonnaire (GR) qui représente 22 %.

Sous-zone 1.3

Elle est localisée au centre de la région de Kayes (Cercles de Kayes, Bafoulabé, Kita) ; avec une superficie de

27.208 km² et une pluviométrie moyenne de 741 mm/an. Elle couvre la totalité de la Falémé Nord et 50 % du Haut Kaarta occidental située dans la région naturelle du HODH. Elle s'étend sur le plateau Mandingue où elle couvre la totalité des zones agro-écologiques du Tambaoura, du Bambouk et du Fouladougou. Le Wénia et le Bélédougou représentent respectivement 18 % et 23 %. Les substrats dominants sont les sols limon-argileux et gravillonnaire qui représentent 24 % et 38 % de la superficie totale.

Sous-zone 2.1

Elle est localisée à l'extrême Nord des régions de Koulikoro et de Ségou avec une superficie de 25.825 km² et une pluviométrie moyenne de 396 mm/an. La zone agro-écologique principale est le Ouagadou dans la région naturelle du HODH ; qui couvre 93 % de la superficie totale de la sous-zone. Les substrats dominants sont les sols sable limoneux (36 %), limon sableux grossiers (25 %) et limon sableux fin (22 %).

Sous-zone 2.2

Elle est localisée au centre de la région de Koulikoro et s'étend un peu à l'Est dans la région de Ségou, avec une superficie de 21.752 km² et une pluviométrie moyenne de 445 mm/an. Les zones agro-écologiques principales sont : le Delta Mort Occidental situé dans le delta central du fleuve Niger, ainsi que le Bas Kaarta et Tyemandali situés dans le HODH. Les types de sols dominants sont les sols limon sableux grossiers (Lisa_g) et sable limon (SA_li).

Tableau 6.3 Ressources de la zone soudano-sahélienne.

	sous-zone															Zone
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	
Caractéristiques générales																
Pluviométrie (mm/an)	473	621	741	396	445	550	741	188	155	250	385	451	585	585	877	
Superficie (mille km ²)	23	25	27	26	22	20	14	30	62	75	35	34	25	18	15	452
Population 1987 (mille hab)	286	315	157	127	159	174	302	300	291	203	333	821	741	544	388	5142
Densité (hab/km ²)	12,3	12,7	5,8	4,9	7,3	8,5	22,2	9,9	4,7	2,7	9,4	24,0	29,6	29,8	25,9	11,4
Effectif animal (mille UBT)	234	171	99	74	86	159	151	201	205	288	330	464	474	352	277	3567
Densité animale (UBT/km ²)	10,1	6,9	3,6	2,9	4,0	7,8	11,1	6,7	3,3	3,9	9,3	13,5	18,9	19,3	18,5	7,9
Terre <6 km d'un PdEP* (%)	66	60	38	43	49	69	96	51	19	18	47	83	91	94	93	

Terre <15 km d'un PdEP (%)	99	95	78	81	96	95	100	74	51	43	81	97	100	100	100	
Production bois (mille m ³ /an)	9,0	14,4	23,0	6,9	7,2	11,5	11,8	0,1	0,0	0,0	4,1	12,9	11,6	14,9	15,0	142,3
Répartition de la superficie sur les substrats (%)																
EC	2,2	7,6	2,4	1,0	2,2	1,2	3,8	10,4	0,0	0,2	10,4	18,4	18,7	11,3	5,4	5,8
GR	14,2	22,2	38,0	5,5	6,8	29,7	45,9	2,8	2,9	4,0	16,6	12,3	8,7	21,5	24,5	13,3
GR_su	0,0	0,0	4,4	0,0	0,0	3,3	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	16,3	30,6	2,7
LIAR	2,4	7,0	0,0	0,0	9,3	0,6	0,0	0,0	0,8	0,4	0,9	2,7	10,9	17,3	23,5	3,6
LILI	11,8	22,7	25,0	2,7	4,0	5,0	26,5	2,3	4,1	2,1	6,2	1,7	8,2	9,7	11,4	7,6
LISA_f	16,1	11,7	10,2	29,6	9,4	20,8	10,1	12,3	16,2	15,5	10,1	13,9	23,0	14,4	2,9	14,9
LISA_g	22,4	9,5	1,1	24,7	39,4	25,8	2,1	20,5	16,4	10,6	6,5	14,8	8,5	1,5	0,0	13,8
SA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,9	26,5	39,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	11,3
SALI	5,8	0,0	0,0	36,2	24,4	10,6	0,0	17,4	0,1	0,0	18,8	5,5	3,8	0,0	0,0	7,3
SU	17,3	10,6	8,4	0,3	0,0	0,9	0,0	0,3	5,6	8,1	9,5	3,1	0,0	0,0	0,0	5,1
SU_inc	6,7	7,5	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
Terre inondée	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	1,3	10,7	2,0	0,5	13,6	23,3	9,9	7,0	0,0	5,2
inapte	1,1	1,2	6,1	0,0	0,0	2,0	0,0	4,5	25,5	19,4	5,7	4,2	3,2	0,8	1,6	8,6
Répartition des UBT sur les types d'animal (%)																
bovins	73,5	79,6	84,1	67,8	71,1	65,2	70,8	54,7	44,7	48,3	70,8	67,6	71,4	73,9	85,3	68,3
ovins	6,2	4,4	4,1	8,6	8,3	10,4	7,0	13,3	14,6	13,3	8,9	11,4	9,7	8,6	6,5	9,5
caprins	7,4	5,2	5,7	9,8	8,7	13,2	9,9	17,9	19,8	20,7	14,1	12,9	10,7	10,0	4,0	11,8
autres	13,0	10,8	6,0	13,8	11,9	11,1	12,4	14,1	20,9	17,7	6,2	8,1	8,2	7,5	4,2	10,3

*PdEP = Point d'Eau Permanent

N.B : Pour le calcul du nombre d'UBT c'est la conversion donnée par [Breman & De Ridder \(1991, page 456\)](#) est employé : 1 UBT = 1,5 bovin = 10 moutons = 12 chèvres = 2 ânes = 1 cheval = 0,8 chameau).

Sous-zone 2.3

Elle est localisée au centre de la région de Koulikoro avec une superficie de 20.465 km² et une pluviométrie moyenne de 550 mm/an. Les principales zones agro-écologiques sont le Tyemandali dans le HODH et le Bélédougou dans le Plateau Mandingue. Les principaux substrats sont les sols gravillonnaires (GR), limon sableux grossiers (LISA_g) et limon argileux (LIAR).

Sous-zone 2.4

Elle est localisée au Sud de la région de Koulikoro avec une superficie de 13.616 km² et une pluviométrie moyenne de 741 mm/an. Le Wénia et le Bélédougou sont les zones agro-écologiques dominantes, situées sur le plateau Mandingue. Le Moyen Bani Niger situé dans le Delta Central du fleuve Niger ne représente que 5 % de cette sous-zone. Les principaux substrats sont les sols gravillonnaires, limon argileux, limon et limon sableux

fin.

Sous-zone 3.0

Elle est localisée au Sud-Ouest de la région de Tombouctou avec une superficie de 30.128 km² et une pluviométrie moyenne de 188 mm/an. Les zones agro-écologiques qui prédominent dans cette sous-zone sont les Daounas situés dans le HODH et la zone lacustre située dans le Delta Central du fleuve Niger. Les principaux substrats sont les sols limon-argileux (LIAR), limon sableux grossier (Lisa_g), sable limoneux (SA_Li) et sable (SA).

Sous-zone 3.1

Elle est localisée à l'Est de la région de Tombouctou s'étend dans la région de Gao, avec une superficie de 38.156 km² et une pluviométrie moyenne de 155 mm/an, la principale zone agro-écologique est le Minkiri situé dans l'Aklé Azaouad, suivie par le Ganderas et le Tin bilal situés dans le Gourma, ainsi que l'Abourak situé dans le Tilemsi.

Sous-zone 3.2

Elle est localisée au Sud des régions de Tombouctou et de Gao, avec une superficie de 44.850 km² et une pluviométrie moyenne de 250 mm/an. Les zones agro-écologiques dominantes sont le In Tillit (61 %) et Tin bilal (18 %) situées dans le Gourma, ainsi que l'Abourak (12 %) situé dans le Tilemsi. Le sable constitue le principal substrat, suivis par les sols limon sableux fins et gravillonnaires. Le substrat INAPT (roche) est aussi non moins important dans cette sous-zone avec 19 % de la superficie totale.

Sous-zone 3.3

Elle est localisée au Sud de la Région de Mopti avec une superficie de 35.427 km² et une pluviométrie moyenne de 385 mm/an. Les principales zones agro-écologiques sont le Dyondé sur le plateau de Bandiagara-Hombori, le Mondoro dans le Gondo-Mondoro, ainsi que le Delta vif, le Delta mort occidental et la zone lacustre dans la région naturelle du Delta Central du fleuve Niger. Les sols dominants sont les sols gravillonnaires, limon argileux, sable limoneux et inondable argileux. Le substrat INAPT (roche) représente 6 % de la superficie de la sous-zone.

Sous-zone 3.4

Elle est localisée au centre de la région de Mopti et s'étend à l'Ouest sur l'extrémité-Est de la région de Ségou (Cercle de Macina). Elle couvre une superficie de 34.229 km² avec une pluviométrie moyenne de 451 mm/an. Les principales zones agro-écologiques de cette sous-zone sont : le Haut plateau Dogon, le Delta vif, le Delta mort occidental et le Séno. Les substrats dominants sont les sols inondables argileux, gravillonnaire, limon sableux grossiers et limon sableux fins.

Sous-zone 3.5

Elle est localisée au Nord de la région de Ségou et s'étale sur l'extrémité Sud de la région de Mopti (Cercle de Djenné) avec une superficie de 25.059 km² et une pluviométrie moyenne de 585 mm/an. Les principales zones agro-écologiques sont le Moyen Bani Niger, le Bas plateau Bobo et la plaine du Sourou. Les substrats dominants sont les sols limon sableux fins et limon argileux.

Sous-zone 3.6

Elle est localisée dans l'extrême Sud de la région de Ségou avec une superficie de 18.276 km² et une pluviométrie moyenne de 747 mm/an. La zone agro-écologique prédominante est le Falo situé sur le plateau de Koutiala et qui détient à elle seule 66 % de la superficie totale de la zone. Elle est suivie par le Moyen Bani Niger, le Bas Plateau Bobo et le Moyen Bani Occidental. Les principaux substrats sont les sols limons sableux fins, gravillonnaire, gravillonnaire superficiel et limon argileux.

Sous-zone 3.7

Elle est localisée dans l'extrême Nord de la région de Sikasso à la limite même de la zone soudano-sahélienne. Elle couvre le Cercle de Yorosso ainsi que le Cercle de Koutiala (qui fera l'objet d'étude de cas). Sa superficie totale est de 14.990 km² avec une pluviométrie moyenne de 877 mm/an. Les zones agro-écologiques de cette sous-zone sont le Moyen Bani Oriental qui représente 74 % de la superficie de la sous-zone, le Falo, (24 %) et le Kéné Dougou (2 %) qui sont tous localisés sur le plateau de Koutiala.

6.2.4. Ressources du cercle de Koutiala

La situation géographique du cercle de Koutiala indique qu'il est situé entre 12deg. 24' de latitude Nord et 5deg. 28' de longitude Ouest et fait partie de la 3ème région administrative du Mali, communément appelée Mali-Sud. Il est limité au Nord et au Nord-Ouest par les cercles de San et Bla (Région de Ségou), au Sud par le cercle de Sikasso et le Burkina-Faso, à l'Est par le cercle de Yorosso et à l'Ouest par le cercle de Dioila. Avec un relief peu accentué, il s'étend sur une superficie de 9100 km². Selon le découpage administratif, il comprend une commune et 6 arrondissements : l'arrondissement central, M'Pessoba, Zangasso, Molobala, Kouniana, et Konséguela. Le climat est de type soudano-sahélien au Nord et soudanien au Sud avec une seule saison pluvieuse. La température moyenne annuelle est de 30 degrés environ (Sivakumar *et al.*, 1984). La saison des pluies s'étale de mai à octobre, et le nombre de jours de pluie varie de 38 à 72 jours (CMDT, 1987-1993). La pluviométrie moyenne annuelle (Sivakumar *et al.*, 1984) est de 980 mm. Les données pluviométriques de la période 1987 à 1992 sont indiquées dans le tableau 6.4.

Tableau 6.4 Hauteurs (mm) et nombre de jours de pluie par poste pluviométrique et par an dans le cercle de Koutiala.

postes	Koutiala		M'pessoba		Molobala		Zebala	
	mm	jours	mm	jours	mm	jours	mm	jours
1986	835	63	1043	50	901	52	855	56
1987	704	68	846	50	715	48	712	44
1988	893	71	773	51	1015	66	857	50
1989	633	64	688	49	740	49	865	53
1990	913	67	618	41	732	60	471	38
1991	843	67	688	54	795	55	767	52
1992	671	72	621	53	649	62	770	56

Les ressources humaines du cercle représentent une population de 286.244 habitants (BCR, 1991) soit une

densité moyenne de 24 hbts km⁻². Cette population à vocation agro-pastorale est composée essentiellement des ethnies Minianka, Bobo et Dionka. La répartition de la population par arrondissement est donnée au tableau 6.5. On note une répartition inégale de la population dans le cercle avec une densité relativement plus faible dans l'arrondissement de Konséguéla par rapport aux autres. L'accroissement de la population du cercle est de 3,3 % par an, donc plus forte que la moyenne nationale (1,9 %). La population du cercle est constituée à 78 % de ruraux travaillant essentiellement dans le secteur primaire. L'estimation de la population par groupe d'âge indique une proportion de 55 %, 5 % et 40 %, respectivement pour les tranches d'âge de moins de 18 ans, 18 à 21 ans, et enfin, 21 ans et plus. Cette population est donc relativement jeune.

Tableau 6.5 Données démographiques pour le cercle de Koutiala en 1987.

arrondissement	superficie (km ²)	population (n)	densité (n km ⁻²)	accroissement (% an ⁻¹)	villages (n)
Koutiala*	1375	104.661	76,1	+3,8	51
Konséguéla	2045	27.069	13,2	+3,1	33
Kouniana	1800	35.420	19,7	+2,7	35
Molobala	1435	34.303	23,9	+3,4	25
M'pessoba	1210	59.825	49,4	+2,8	55
Zangasso	1235	24.966	20,2	+3,5	32
Cercle	9100	286.244	31,5	+3,3	231

Source: BCR (1991)

Les principaux types de sols et leur importance dans le cercle de Koutiala sont présentés au tableau 6.6. Les sols ont été caractérisés déjà dans la section II.6.2. Parmi les principaux types de sols distingués dans le cercle de Koutiala, le sol gravillonnaire très superficiel (GR_su) est le sol le plus fréquent (41 %), suivi par le sol limon-argileux (LIAR, 27 %) et le sol gravillonnaire peu profond (GR, 21 %).

Tableau 6.6 Les types de sol et leur importance dans le cercle de Koutiala.

code	substrats	km ²	%
EC	écoulement	296	3
GR	gravillonnaire	1918	21
GR_su	gravillonnaire superficiel	3721	41
LIAR	limon-argileux	2430	27
LILI	limon-limoneux	428	5
LISA_f	limon-sableux fin	282	3

Donc plus de 60 % du cercle sont occupés par des sols peu aptes aux cultures (GR et GR_su). Leur position et leur profondeur causeront un épuisement rapide et un ruissellement et un drainage horizontal fort. constitue 32

% de la superficie totale du cercle. Par leur position en aval des sols gravillonnaires, les sols LIAR et EC au moins reçoivent de l'eau de ruissellement. Le sol d'écoulement (EC) correspond au sol inondable argileux et n'occupe que 3 % de la superficie du cercle. Il se présente notamment dans les vallées à inondation saisonnière. Ce type de sol possède de bonnes possibilités pour l'intensification à condition que l'engorgement soit maîtrisé.

Le cheptel du cercle de Koutiala a connu un accroissement important à cause du développement d'autres types d'élevage, à côté de celui des propriétaires traditionnels vivant encore de l'élevage (Bremas & Traoré, 1987). Il s'agit notamment des agriculteurs, commerçants et fonctionnaires qui investissent de plus en plus dans le bétail. L'importance accrue du cheptel dans le système de production de cette zone s'explique par le fait que le troupeau constitue un moyen d'investissement et d'épargne. Par ailleurs, l'activité d'élevage est complémentaire à celle de la culture. Elle lui procure la force de traction et le fumier et reçoit d'elle les sous-produits. Ceci est bien le cas que la concentration du troupeau se fait dans les secteurs où la densité humaine est par ailleurs très élevée et où la pression sur l'espace liée à la culture cotonnière est également très forte (CMDT, 1993). Ainsi, selon cette étude, la situation du cercle de Koutiala peut se définir par une forte concentration autour de M'pessoba, Koutiala, Zebala et Molobala, où la densité est largement supérieure à la moyenne et par la présence d'une auréole concentrique autour de la précédente où la densité est moyenne à forte. Les raisons diverses présidant à l'acquisition récente du troupeau, la surpâturage et la méconnaissance des techniques des nouvelles formes d'élevage expliquent la faible productivité du cheptel dans cette zone (Bremas & Traoré, 1987 ; [Bremas & De Ridder, 1993](#)).

La majorité du cheptel appartient aux cultivateurs, mais sa répartition entre exploitations est inégale selon une étude réalisée autour de Koutiala (Touré *et al.*, 1992) : dans cette zone, 21 % des exploitations possèdent 65 % des bovins. D'autre part, au sein d'une même unité de production, la propriété du cheptel est généralement individuelle. Le troupeau appartient soit exclusivement au chef d'exploitation et constitue de ce fait un patrimoine commun, ou en partie à certains membres de l'exploitation. Cela pourrait avoir un impact sur la gestion du troupeau d'une façon générale et sur l'entretien sanitaire en particulier. Toutefois, la fumure produite dans les parcs de stabulation de ces animaux est utilisée dans les champs communs à tous les membres de l'exploitation.

Les espèces animales élevées sont diverses. Les bovins sont en général du type méré qui est issu du croisement entre les races Zébu et N'dama. L'effectif du troupeau en 1993 dans les secteurs d'encadrement CMDT (qui diffèrent des arrondissements) du cercle de Koutiala est indiqué dans le tableau 6.7. Il ressort de l'étude de Touré *et al.*, (1992), que le mode de conduite des animaux varie selon les saisons, la taille du troupeau et l'espèce animale. La surveillance d'un berger est nécessaire pendant la saison des pluies dans le souci de limiter les dégâts sur les cultures. Pendant la saison sèche, les résidus de récolte, notamment les pailles de céréale constituent une source alimentaire d'appoint non négligeable pour les animaux. En plus des pâturages herbacés et des résidus de récolte, le bétail trouve une partie de son alimentation dans les pâturages arbustifs. Selon Leloup *et al.*, (1989), la contribution respective des strates ligneuses, herbacées, des sous-produits de qualité médiocre (pailles de céréale), et des sous-produits de bonne qualité (fanés, tourteau de coton, etc.) a été estimée à 14, 33, 46 et 7 % de la matière sèche totale à Kaniko (village situé dans les environs de la commune de Koutiala). L'abreuvement des animaux ne constitue pas un gros problème. Il s'effectue de façon passive pendant l'hivernage dans les marigots et active en saison sèche à partir des puits appartenant aux propriétaires. Le manque de pâturage constitue l'une des plus grandes contraintes de l'élevage dans la zone de Koutiala, surtout en fin de saison sèche et en début de saison pluvieuse. Les graminées pérennes qui étaient abondantes et dominantes ont cédé la place aux graminées annuelles à cause de la surpâturage et la sécheresse (Leloup *et al.*,

1989). Joint à la pression démographique, les superficies naguère réservées aux pâturages sont en nette régression. Ceci conduit les exploitations possédant de grands troupeaux à rompre avec la vocation première de cet élevage qui est la sédentarité et à pratiquer la courte transhumance. Les sécheresses successives qui ont frappé la zone nord du Mali, ont entraîné le déplacement d'une bonne partie du cheptel vers le Sud, dépassant même dans certains cas les limites du territoire national. Cette migration fuite a permis de sauver une partie du cheptel mais, a induit de profonds changements dans le système de l'élevage

Tableau 6.7 Effectifs animaux du cercle de Koutiala (1992-93).

secteurs	bovins	ovins/caprins	asins	equins	porcins
Koutiala	80.073	53.631	5062	83	1817
M'pessoba	47.929	32.118	5754	35	1184
Molobala	42.759	19.734	2659	48	5006
Zebala	42.696	42.856	3047	167	1433
Cercle	213.457	148.339	16.522	333	9440

Source: Rapport CMDT, 1992/1993

Tableau 6.8 Importance et répartition des types d'exploitations dans le cercle de Koutiala.

type	caractérisation	nombre	(%)
A	équipée avec un troupeau	9092	46
B	équipée sans troupeau	7905	40
C	non-équipée, qui emprunte une équipe	2383	12
D	non équipée	401	2
total		19.781	100

Source: DLV ; Estimations basées sur Annuaire Statistique CMDT (1994) - Résultats de l'enquête agricole permanente 1993/1994.

6.2.5. Environnement socio-économique et institutionnelle à Koutiala

L'environnement institutionnelle du cercle de Koutiala est assez riche avec la présence de plusieurs structures de développement et d'encadrement du monde rural. La Compagnie Malienne de Développement des Textiles (CMDT) est la principale structure d'encadrement et de vulgarisation qui couvre l'ensemble du cercle. Le secteur de l'Élevage est chargé de l'encadrement du monde éleveur en matière d'amélioration de l'alimentation, de la production et de la santé animale. Le cantonnement forestier est chargé de la police forestière et de l'encadrement des populations en matière d'exploitation et de productions forestières. Le projet Aménagement Agro-pastoral de la 3ème région est un projet d'appui aux éleveurs dans les domaines de l'aménagement pastoral, le forage de puits, l'hydraulique pastorale et les cultures fourragères. Le Centre d'Action Coopérative (CAC) est chargé de la promotion, de l'animation et de l'encadrement des structures coopératives du cercle. La

recherche agronomique est menée depuis plusieurs décennies en zone Mali-Sud par l'Equipe DRSPR-Sikasso ainsi que par la Station de Recherche Agronomique de N'Tarla. Les Projets « lutte anti-érosive » et « Femmes et Développement » au sein de la CMDT sont aussi des structures de recherche-développement respectivement dans le domaine de la lutte contre l'érosion et la dégradation des sols, et le soutien du rôle des femmes dans le développement rural. Les organisations non gouvernementales actives dans le cercle sont : Vision Mondiale, Action internationale contre la faim et Centre International de Développement et de Recherche (CIDR). Ce dernier a financé la mise en place d'une laiterie pour promouvoir la production de lait dans la commune et sa périphérie en vue d'améliorer ainsi les revenus des éleveurs. L'ensemble des actions de développement du cercle sont coordonnés par le comité local de développement (CLD) présidé par le commandant de cercle.

Les principales structures de crédit dans le cercle sont : la CMDT et la Banque Nationale de Développement Agricole qui allouent des crédits aux organisations paysannes dans le cadre de l'achat d'équipement et d'intrants. Dans le domaine de la mobilisation de l'épargne rurale, il y a la Caisse d'épargne et de crédit rural appelée « Kafo Jigenè ». D'autres structures de crédit bancaire sont aussi représentées telles que la Banque Malienne de Développement et la Banque Internationale de l'Afrique de l'Ouest.

Il existe plusieurs marchés ruraux dans le cercle qui constituent les lieux d'écoulement des extrants (bétails, produits agricoles) et les lieux d'approvisionnement en extrants. Les marchés les plus importants du cercle sont Koutiala (Commune), Molobala, M'Pessoba, N'Togonasso et Sadiola. Pour le bétail N'Togonasso est le marché à bovin le plus important du cercle et celui de la commune le marché de petits ruminants, du point de vue offre. Les transactions commerciales sur les marchés ne se limitent pas seulement aux animaux mais concernent aussi les produits agricoles car le cercle de Koutiala est une zone de forte production de mil, de sorgho et de maïs.

L'organisation du monde rural est généralement à un stade très avancé par rapport à d'autres zones du Mali. Il existent ainsi plusieurs organisations paysannes qui jouent un rôle important dans l'approvisionnement en intrants et dans l'écoulement des produits. L'Association Villageoise (AV) est la structure transitoire vers le Ton Villageois (structure pré-coopérative). Dans le cercle de Koutiala il existait en 1994, 20 Tons villageois et 345 AV (CLD ; 1994. PP 9). Il existe 6 coopératives centrales d'approvisionnement et de commercialisation dans le cercle et d'autres coopératives telles que la Coopérative des éleveurs de Welingana ; la Coopérative des éleveurs de M'Pessoba ; la Coopérative agro-pastorale de Koutiala ; la Coopérative agricole de N'Togonasso ; la Coopérative des anciens combattants et victime de guerre ; la Coopérative des transporteurs routiers de Koutiala ; la Coopérative des maraîchers et planteurs de Koutiala ; la Coopérative des riziculteurs de Koutiala. Soit au total 14 coopératives dans le cercle (Source CAC, Koutiala, décembre 1993). Il y a aussi le Syndicat des producteurs de coton et vivriers (SYCOV) qui est une autre structure dans les domaines de l'appui et la défense des intérêts des paysans du cercle. Actuellement, SYCOV est devenu un partenaire à part entière de la CMDT. A ce titre, il est membre du Conseil d'Administration de la CMDT et signataire du Contrat-Plan CMDT-Etat. La Délégation de la Chambre d'Agriculture de Koutiala est une structure représentative des agriculteurs, éleveurs, pêcheurs et bûcherons du Cercle. Les Groupements de producteurs laitiers sont la création du CIDR qui a initié et encouragé leur création dans la périphérie de la ville de Koutiala. Des contrats de livraison de lait frais à la laiterie ont été signés avec ces groupements pendant toute l'année. En 1994, il y avait dix groupements laitiers qui ont livré du lait à la laiterie (Dembélé, 1995). Ce sont les groupements de producteurs laitiers de Wolodougou, Signè, Sirakélé II, N'Goukan, Ouendjina II, Kaniko I, Kaniko II, Namposséla, Shikolomba, et de la Commune de Koutiala.

Le régime foncier au Mali se caractérise par la coexistence du régime foncier coutumier et du code domaniale et

foncier. Dans le système coutumier l'accès à la terre se fait par droit de hache ou de feu et par héritage (A. Maïga *et al.*, 1994). La majorité des terres de culture (plus de 90 % des terres cultivées au Mali) sont gérées de façon coutumière. Les villages sont ainsi de véritables centres de décisions concernant le foncier. D'une manière générale, selon ce droit coutumier, la famille fondatrice a le droit d'attribuer et d'exploiter la terre, d'y planter des arbres, d'y construire et elle a un droit de retour sur les jachères. Ceux à qui des terres ont été attribués par ces familles fondatrices ont d'une manière générale un droit d'utilisation pour lequel la période n'est pas fixée. Ils ne sont pas autorisés de planter des arbres et de construire des maisons et n'ont pas un droit de retour sur les jachères (Coulibaly & Joldersma, 1991 ; DRSPR, 1990). Le code domanial et foncier au Mali reconnaît le droit coutumier tant que l'Etat n'aura pas besoin des terres sur lesquelles il s'exerce. Les terres soumises au régime juridique dans lequel les domaines privés sont reconnus et protégés sont peu importantes et ne représentent que moins de 10 % des surfaces cultivées.

Pour la Gestion des ressources forestières, selon le droit foncier coutumier la coupe des arbres est libre aussi bien pour les autochtones que pour des allochtones, sauf pour certaines espèces protégées (néré, karité, autres). Il est à noter que les gouverneurs de région peuvent protéger par arrêté toute espèce de valeur qu'ils jugeront utile de protéger. La coupe ou l'arrachage des arbres et arbustes dans le but de nourrir les animaux semblent être interdit uniquement pour la zone sahélienne. Pour impliquer davantage la population dans la gestion de leur patrimoine forestier, il est proposé que des contrats se fassent avec les communautés villageoises pour l'exploitation de leurs ressources (DNEF, 1989).

Il est à noter qu'un code pastoral qui règle l'accès aux pâturages communs, même s'il est élaboré, est très mal connu ou non appliqué. L'utilisation des pâturages est libre aussi bien pour les autochtones que les allochtones sur les terres non mises en valeur. D'une manière générale les animaux étrangers ne sont pas autorisés de passer sur les champs récemment récoltés avant que les animaux des propriétaires soient passés là-dessus.

6.3. Quantifier les relations intrants-extrants pour les activités de production

6.3.1. Introduction

L'exploration et l'analyse du potentiel d'exploitation des ressources de la région à l'aide du modèle de Programmation Linéaire à Buts Multiples (PLBM) requièrent des éléments permettant de caractériser les différentes options. Ces pièces maîtresses sont appelées « activités de production ». Ces activités sont des façons bien définies et quantifiées de production agricole, où une combinaison unique d'intrants résulte en un mélange unique d'extrants agricoles. Concernant les activités culturelles, les intrants comprennent, entre autres, la quantité de terre, les besoins en main d'oeuvre pour les opérations au champ, la traction animale, les fertilisants et le fumier. Les extrants peuvent inclure le produit de la récolte, les résidus de culture et les impacts environnementaux secondaires tels que les pertes de sol par érosion. En ce qui concerne les activités d'élevage, les intrants comprennent la quantité de fourrage et sa qualité, la main d'oeuvre et le capital, tandis que les extrants comprennent le poids vif (la viande), le lait, le fumier et la traction. Pour une description plus élaborée des activités de production utilisée dans le modèle de PLBM, voir Quak *et al.*, (1996) et [Bakker *et al.*, \(1996\)](#).

La qualité et la quantité de la ressource naturelle de base définissent le cadre du développement agricole. Les rendements des activités de culture sont, entre autres, fonction d'une combinaison de caractéristiques de cultures, de propriétés de sol et de conditions climatiques. Elles déterminent le potentiel de production des cultures. Pour la description des activités de culture, on a appliqué ce qui a été baptisé « l'approche ciblée » : on

détermine tout d'abord « l'objectif à atteindre », c'est-à-dire la production (extrant) en fonction de la qualité et de la quantité de la ressource naturelle de base, puis les besoins et moyens à mettre en oeuvre (intrants) pour atteindre ce but (Van Duivenbooden *et al.*, 1991). La section 6.3.2 illustre cette approche en se basant sur les matrices intrants/extrants de cinq activités liées à la culture du sorgho.

Du fait que le projet PSS vise une exploration des options de développement durable pour la région soudano-sahélienne, les facteurs affectant la durabilité agro-écologique ont bien évidemment été pris en compte dans la définition des activités culturelles. A cet égard, durabilité agro-écologique signifie que les rendements ne seront pas entravés à la longue. La production actuelle dans la région soudano-sahélienne est menacée par un épuisement de la matière organique du sol et des nutriments et par des pertes de sol dues à l'érosion, le résultat étant une réduction des rendements (Van Keulen & Breman, 1990). Dans le modèle PLBM, la durabilité agro-écologique est opérationnalisée en termes d'apports équilibrés de matière organique et de nutriments, et d'érosion de sol limitée. On suppose que les pertes annuelles de matière organique par décomposition sont compensées par des résidus de récolte, du fumier, ou par la matière organique produite pendant une période de jachère. Les macro-nutriments (N, P et K) retirés au système par la récolte des produits consommables et/ou des résidus des cultures, ainsi que par les pertes inévitables (lessivage, dénitrification et volatilisation) sont compensés par des apports issus des résidus de récolte et du fumier, des engrais et les apports annuels d'origine naturelle (dépôts, micro-organismes fixateurs de nutriments, et altération). De plus, les activités de culture sont définies de sorte que l'érosion du sol n'excède pas une certaine perte annuelle de sol tolérée (basée sur les estimations du PIRT, 1983b) qui varie de 2 à 10 t ha⁻¹ an⁻¹ en fonction du type de substrat. La description de l'érosion s'appuie sur la « Universal Soil Loss Equation » (USLE) développée par Wischmeier & Smith (1960) et qui a été étalonnée par Roose (1977) pour répondre aux conditions ouest-africaines spécifiques. L'érosion du sol peut être réduite par billonnage ou buttage, mais ceci demande de la main d'oeuvre et du capital. Sur les sols sensibles à l'érosion, le buttage doit être pratiqué à des distances plus courtes que sur les autres pour limiter l'érosion annuelle et pour satisfaire ainsi à la condition de la perte tolérée. Cette exigence se répercute aussi sur les niveaux d'intrants (capital et main d'oeuvre) investis dans les activités de culture.

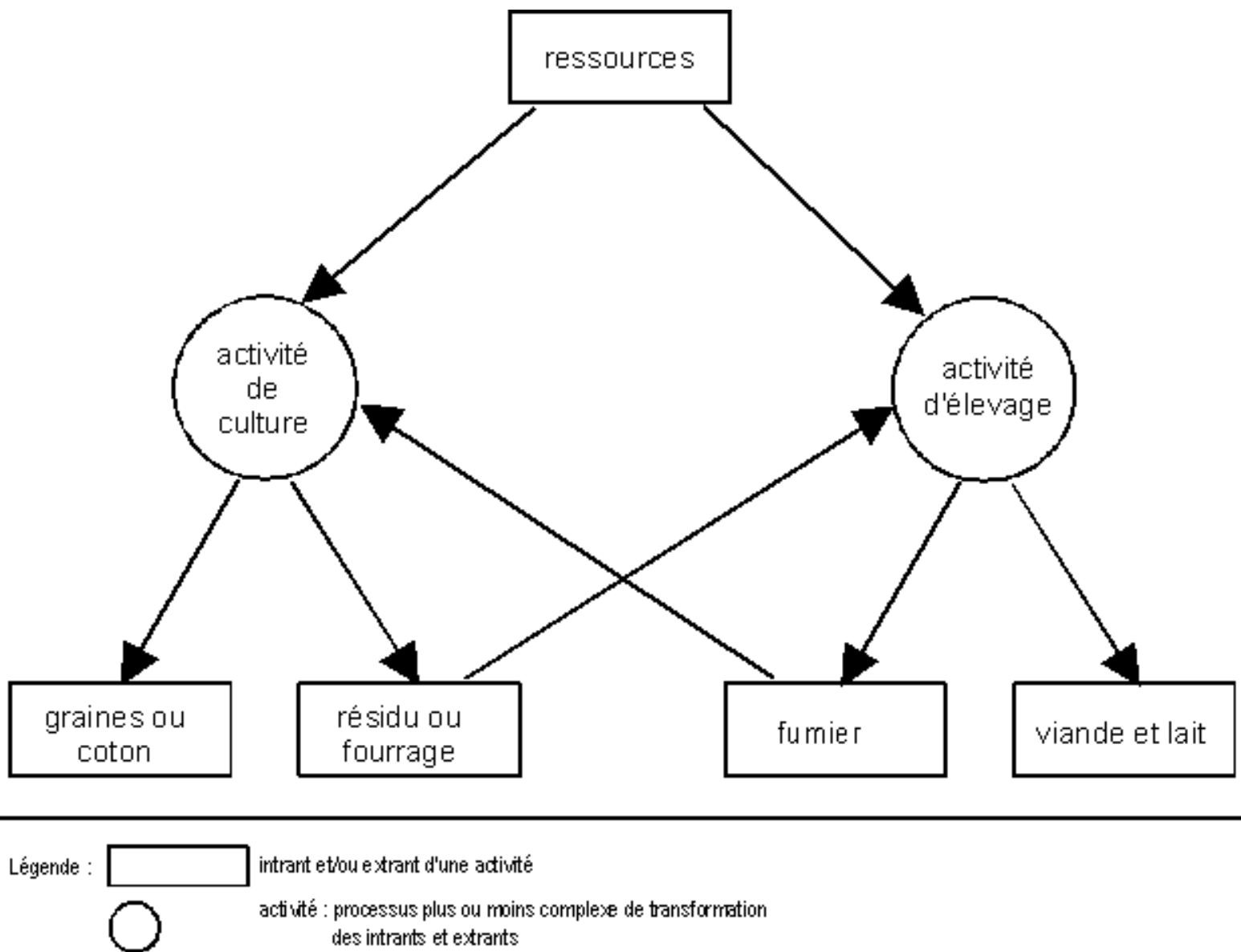


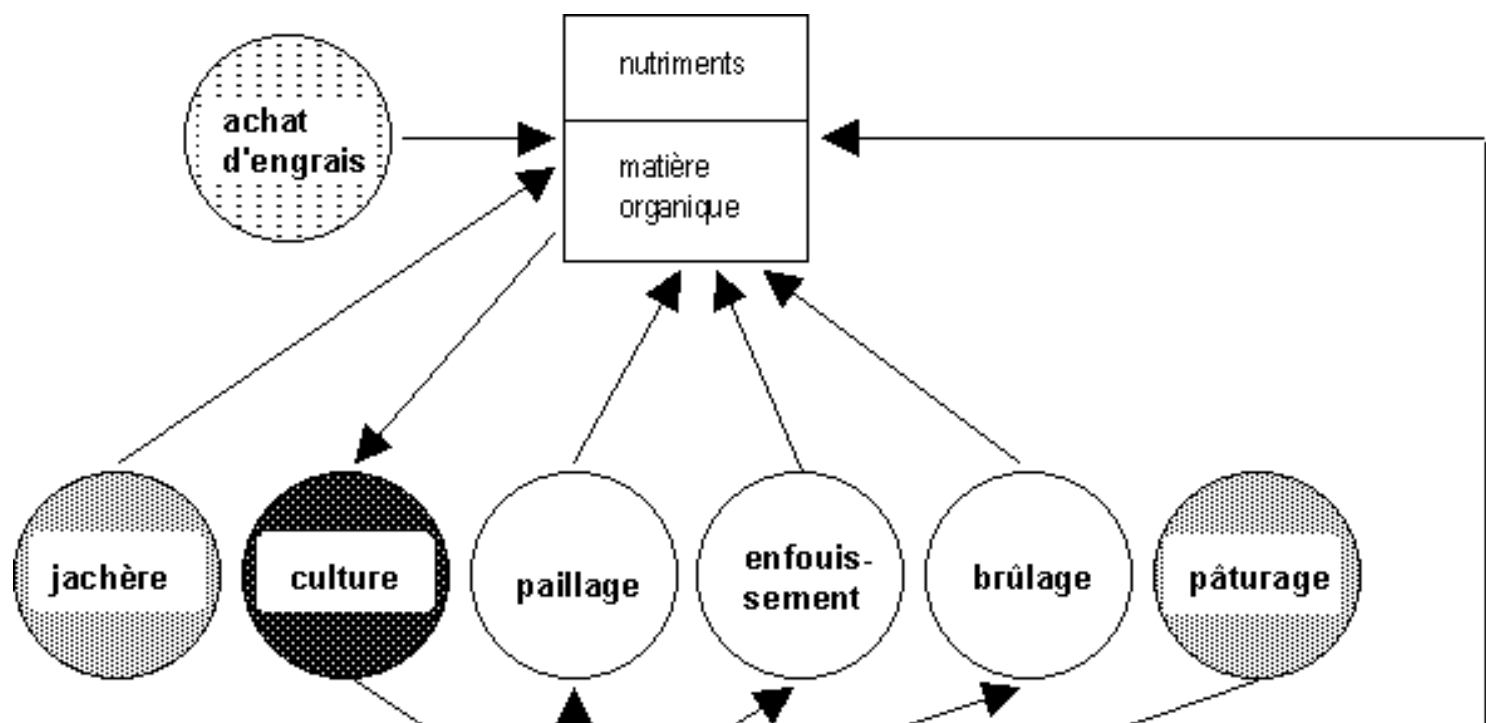
Figure 6.5. Diagramme relationnel des activités de culture et d'élevage : en ce qui concerne leur compétition pour les mêmes ressources et leur interaction à travers les sous-produits.

L'intégration des systèmes de culture et d'élevage a été identifiée comme l'un des éléments clés du développement agricole de la région soudano-sahélienne du Mali (Breman, 1990). Une intégration des deux activités peut avoir des répercussions bénéfiques sur l'une et sur l'autre de ces activités. L'activité de culture peut produire des fourrages de meilleure qualité (par ex. le niébé) ou des résidus de récolte (paille) qui peut être investis dans les activités d'élevage pour accroître la production de viande et de lait, tandis que le fumier peut être appliqué sur les terres cultivables pour en améliorer le taux de matière organique et la teneur en éléments nutritifs. L'interaction entre intrants et extrants, dans les deux systèmes de production, est illustrée de manière sommaire dans figure 6.5. Les deux systèmes sont en compétition pour les mêmes ressources de base (terre, eau, main d'oeuvre et capital), leurs productions finales sont destinées à satisfaire des objectifs nationaux ou individuels (grains, coton, viande et lait). Les sous-produits de l'un (résidus de récolte ou fumier) sont exploités comme intrants dans l'autre.

Pour mieux évaluer toutes les options offertes par l'utilisation des sous-produits, plusieurs activités de transformation ont été définies. Chaque option présente des avantages et des désavantages en termes de pertes d'éléments nutritifs, de besoins en main d'oeuvre et de contribution à la régénération des taux de matière

organique du sol et d'éléments nutritifs. Les activités de transformation ne fournissent pas directement des produits finaux destinés à satisfaire les besoins humains, mais servent à transférer les sous-produits d'une activité (extrait) vers une autre (intrait). Cette distinction est artificielle mais nécessaire d'un point de vue du modèle PLBM, pour réduire sa taille. L'extrait de ces activités de transformation fournit deux types de réservoir, le réservoir des résidus de récolte/fourrage ou le réservoir en matière organique/éléments nutritifs. Les deux types de réservoirs se retrouvent au niveau de la ferme et du champ. Trois types d'activités fournissent des produits finaux de consommation et des sous-produits : l'activité de culture, d'élevage de troupeau et d'élevage d'embouche. Deux types d'activités ne fournissent que des sous-produits : l'activité de pâturage et de jachère. Six types d'activités sont utilisées pour transformer ou transporter les sous-produits : (i) l'activité d'enfouissement, avec utilisation des résidus comme mulch pour réduire l'érosion du sol et reconstituer les réserves de matière organique du sol, (ii) l'activité de paillage, avec le labourage des résidus de récolte et du fumier en profondeur, afin de maintenir les réserves de matière organique, (iii) l'activité de brûlage des résidus de récolte sur le champ pour faciliter le labourage et récupérer rapidement les éléments nutritifs qu'ils contiennent, (iv) l'activité de fabrication de litière, impliquant le mélange des résidus de récolte et du fumier à la ferme, afin d'exploiter la capacité fixatrice d'azote de la paille, (v) l'activité de transport des résidus à la ferme, pour l'affouragement du bétail en stabulation, et (vi) l'activité de transport de matière organique de la ferme au champ, pour l'apport de matière organique et de nutriments afin de renforcer les stocks de matière organique et de nutriments du sol. En outre, des fertilisants et des suppléments fourragers peuvent être achetés pour approvisionner les réservoirs de matière organique/nutriments et de résidus/fourrage. Le lien entre toutes ces activités est présenté à la figure 6.6 qui constitue un diagramme relationnel des types d'activités définis. Les activités de culture sont décrites au [paragraphe 6.3.2](#). Les activités d'élevage de troupeau et d'élevage pour l'embouche sont décrites au [paragraphe 6.3.3](#). D'autres types d'activités sont traitées au [paragraphe 6.3.4](#). Les caractéristiques des différents types (critères de définition, unités et produits, intrants et extraits) présentées dans la figure 6.6 sont résumées au tableau 6.9.

Les produits intermédiaires, les résidus de récolte et le fumier, ou en termes plus généraux les sources de matière organique (y compris les éléments nutritifs) jouent un rôle crucial dans l'intégration des systèmes de culture et d'élevage, ainsi que pour les objectifs du projet en ce qui concerne notamment l'analyse et l'exploration des possibilités de développement agricole durable dans la région soudano-sahélienne.



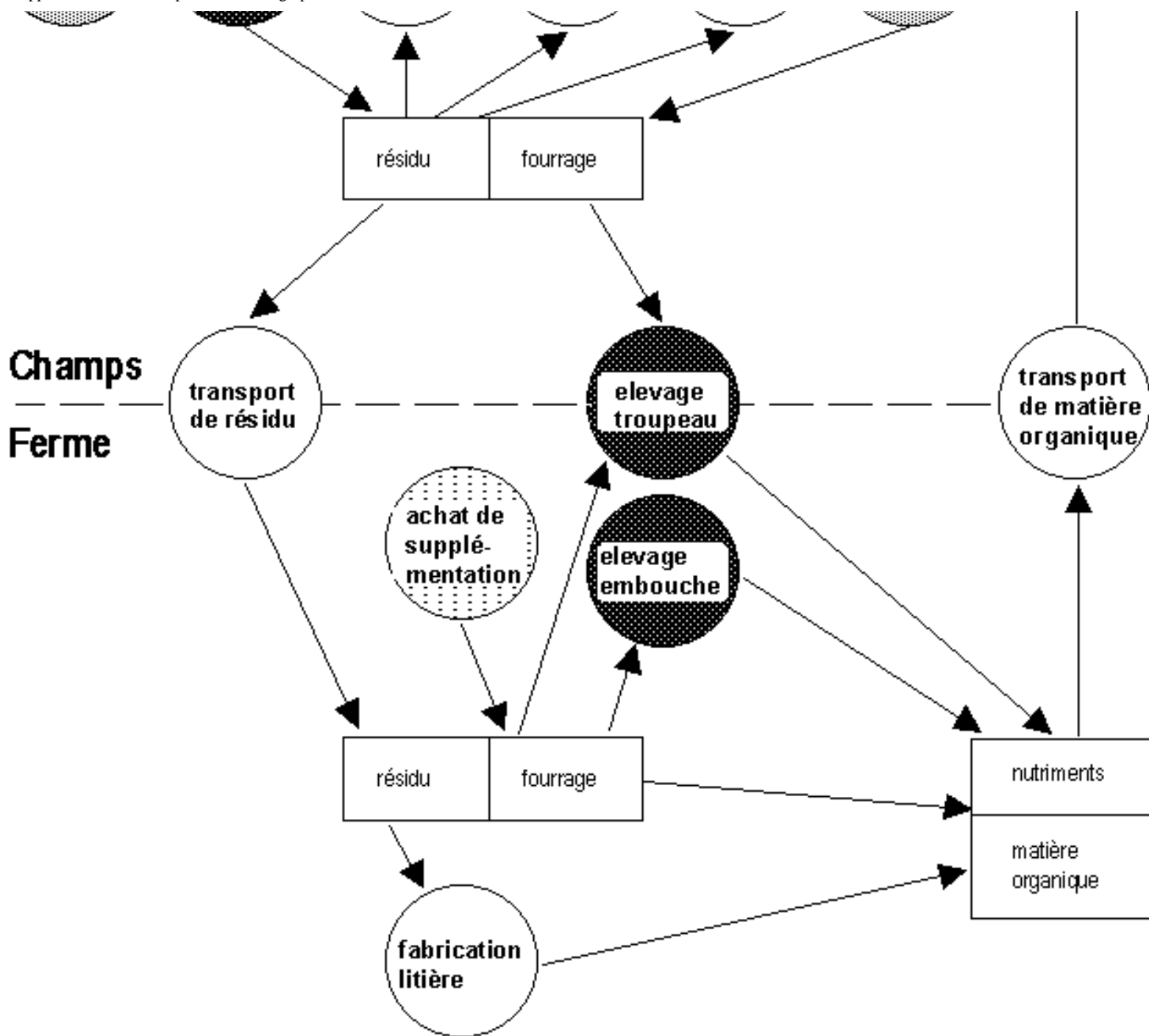


Figure 6.6. Diagramme relationnel des activités de production et de leurs sous-produits.

Tableau 6.9 Définition des activités, leurs intrants et extrants et les unités d'expression.

activités	critères de définition	intrants ¹⁾	unité	extrants	unité
culture	sous-zone	terre	ha	produit principal (f)	kg ha ⁻¹
	climat	capital	F cfa ha ⁻¹	résidus/fourrage (c)	kg ha ⁻¹
	sol	main d'oeuvre	hj ha ⁻¹ 2)	MOST (f)	UMO ha ⁻¹

	type de culture	MOST (c)	UMO ha ⁻¹	NPK (f)	kg ha ⁻¹
	niveau de production	NPK (c)	kg ha ⁻¹	capacité de récupérer N	kg N ha ⁻¹
	utilisation de résidus	boeufs de labour	bj ha ⁻¹ 3)		
	mesures de conservation de l'eau et du sol				
elevage troupeau	âge de vente	fouillage (c)	F cfa ha ⁻¹	lait et viande	kg UBT ⁻¹
	intensité	fouillage (f)	hj ha ⁻¹	MOST (c+f)	UMO ha ⁻¹
		capital	kg	NPK (c+f)	kg ha ⁻¹
		main d'oeuvre	kg	boeufs de labour	UBT UBT ⁻¹
elevage embouche	âge de vente	fouillage (f)	kg	viande	kg UBT ⁻¹
	intensité	capital	F cfa ha ⁻¹	MOST (f)	UMO ha ⁻¹
		main d'oeuvre	hj ha ⁻¹	NPK (f)	kg ha ⁻¹
jachère	sous-zone	terre	ha	MOST (c)	UMO ha ⁻¹
	sol			NPK (c)	kg ha ⁻¹
pâturage	sous-zone	terre	ha	fouillage (c)	kg ha ⁻¹
	climat			bois	m ³ ha ⁻¹
	sol				
	type de pacage				
brûlage des résidus	sous-zone	résidus (c)	kg	PK (c)	kg kg ⁻¹
	sol	main d'oeuvre	hj ha ⁻¹		
	culture				
enfouissement des résidus	climat	résidu (c)	kg	MOST (c)	UMO kg ⁻¹
	sol	main d'oeuvre	hj kg ⁻¹	NPK (c)	kg kg ⁻¹
	culture	capital	F cfa kg ⁻¹		
		boeufs de labour	bj kg ⁻¹		
paillage en utilisant les résidus	sous-zone	résidus (c)	kg ha ⁻¹	MOST (c)	UMO ha ⁻¹
	climat	main d'oeuvre	hj ha ⁻¹	NPK (c)	kg ha ⁻¹
	sol				
	culture				

	niveau de production				
fabrication de litière	sous-zone	résidu (f)	kg	MOST (f)	UMO kg ⁻¹
	culture	main d'oeuvre	hj kg ⁻¹	NPK (f)	kg kg ⁻¹ résidus
				capacité de récupérer N	kg N kg ⁻¹ résidus
transport des résidus	sous-zone	résidus	kg	résidus/fourrage (f)	kg
à la ferme	sol	main d'oeuvre	hj kg ⁻¹		
	culture	capital	F cfa kg ⁻¹		
	mode de transport				
transport de matière	climat	MOST (f)	UMO	MOST (c)	UMO
organique au champ	sol	NPK (f)	kg UMO ⁻¹	NPK (c)	kg UMO ⁻¹
	mode de transport	capital	F cfa UMO ⁻¹		
		main d'oeuvre	hj UMO ⁻¹		
achat d'engrais		capital	F cfa kg ⁻¹	NPK (c)	kg
achat de suppléments		capital	F cfa kg ⁻¹	fourrage (f)	kg

1)(c) = au champ, (f) = à la ferme ;

2) hj = homme-jour ;

3) bj = boeuf-jour

Vu que la qualité de la matière organique diffère selon sa source - ce qui se répercute aussi sur leur capacité à maintenir le taux de matière organique du sol - les sources diverses sont exprimées en Matière Organique Standard (MOST). Une unité de MOST (UMO) est définie comme étant la quantité de matière organique (d'une qualité donnée) susceptible de maintenir 1 % de matière organique dans les premiers 20 cm d'un sol argileux sur un hectare de champ pendant une journée d'activité microbienne optimale. Trois variables sont nécessaires pour calculer l'apport de MOST requis d'une activité de culture (en terme d'UMO par ha) pour maintenir le taux de matière organique du sol :

- le taux cible de matière organique qui doit être maintenu dans la couche supérieure du sol ;
- le nombre de jours d'activité microbienne optimale qui est, pour les cultures pluviales, une fraction (0,4) de la longueur de la saison de croissance, et pour les cultures inondées 0.1 fois la période d'inondation ;
- la texture du sol. La matière organique fraîche est protégée contre la décomposition par la liaison des particules argileuses (Verberne *et al.*, 1990). Plus la teneur en argile d'un sol est élevée, plus de matière organique fraîche est requise pour maintenir la teneur cible dans le sol. Comparé au sol argileux, un sol sableux a besoin d'une quantité de MOST de 1,6 fois plus élevée.

La valeur des sources de matière organique en termes de MOST dépend de la teneur en fibres (lignine, (hemi-)cellulose) du produit. Une relation entre la teneur en fibres et la quantité de matériau organique pour obtenir 1 UMO est dérivée du modèle dynamique de matière organique du sol développé par Verberne *et al.*, (1990). La valeur de la plupart des résidus de récolte, en termes de MOST, correspond par exemple à 0,04 UMO kg⁻¹.

Pour maintenir un taux de 1,5 % dans le sol argileux d'une zone connaissant une saison pluvieuse de 120 jours, il faut un apport annuel de MOST de (1,5 * 120 * 0,4), soit 72 UMO ha⁻¹. Si cet apport est constitué exclusivement de pailles, les résidus de récolte doivent représenter 72/0,04, soit 1800 kg ha⁻¹. Pour un sol sableux, il faut 1,6 fois plus de résidus.

6.3.2. Les activités culturales

6.3.2.1. Critères de définition

Pour pouvoir traiter une activité spécifique, il faut en connaître les caractéristiques. Celles-ci, souvent appelées «critères de définition» comprennent, d'une part, les conditions de milieu (pluviosité, sol) dans lequel l'activité est exécutée et, d'autre part, les techniques qu'elle exploite. Les critères de définition pour les activités liées aux cultures pluviales et inondées sont indiqués au tableau 6.10. Pour les cultures inondées (qui englobent dans le chapitre 6 les cultures irriguées), le critère relatif aux mesures de conservation des eaux et des sols n'est pas appliqué. Ces activités s'appuient en conséquence sur six critères. Une série de variables a été définie pour chaque critère. Ces variables peuvent être combinées avec toute autre variable d'un autre critère.

Tableau 6.10 Critères et variables des activités liées aux culture pluviales et inondées.

sous-zone	pluviosité	sol	culture	niveau de production	utilisation de résidus	mesures conservation
SZ_11	sec	EC	<i>Andropogon</i>	extensif	enfouissement	à plat
SZ_12	normal	GR	<i>Andropogon</i> , repousse	semi-extensif	paillage	billons simples
SZ_13		GR_su	arachide	semi-intensif	brûlage	billons cloisonnés
SZ_21		LIAR	bourgou	intensif	broûtage	
SZ_22		LILI	coton		fouillage à la ferme	
SZ_23		LISA_f	maïs		fouillage au champ	
SZ_24		LISA_g	mil			
SZ_30		SA	niébé			
SZ_31		SALI	niébé fourrager			
SZ_32		SU	riz irrigué par gravité			
SZ_33		SU_inc	riz irrigué à la pompe			

SZ_34		IN_H1	riz submersion contrôlée			
SZ_35		IN_H2	riz submersion non contrôlée			
SZ_36		IN_H3	sorgho			
SZ_37		IN_H4	sorgho de décrue			
		IN_H5				
		IN_H6				
		IN_H7				

Voir le texte pour l'explication des abréviations.

Les sous-zones

La région soudano-sahélienne est divisée en 15 sous-zones relativement homogènes en ce qui concerne les caractéristiques pédologiques et climatiques. Les frontières administratives ont également été prises en compte pour simplifier la collecte des données statistiques. Les 15 sous-zones sont orientées d'Ouest à l'Est parce que la pluviométrie - l'un des facteurs climatologiques principaux - varie surtout du Nord au Sud (de 300 à 900 mm par an). Pour une explication plus détaillée sur le zonage de la région soudano-sahélienne, voir Sissoko *et al.*, (1996). Voir aussi la [section 6.2](#) pour la carte de la région soudano-sahélienne et la situation des sous-zones.

La pluviosité

Le climat constitue l'environnement de croissance des plantes ; il représente, par exemple, une quantité moyenne annuelle d'insolation et de pluies. Pour chaque sous-zone, le climat a donc été caractérisé en termes d'insolation, de pluviométrie, de nombre de jours de pluie, d'évapotranspiration potentielle et de déficit en pression de vapeur, sur la base des données climatologiques enregistrées pendant 30 ans (1961 - 1990) par la Direction Nationale de la Météorologie. Ces données sont exploitées par décennie et réparties en années sèches et normales. Les années sèches représentent les 20 % des années les plus sèches, tandis que les années normales représentent les 60 % des années les plus proches à la pluviosité moyenne, pendant la période allant de 1961 à 1991.

Le sol

Le sol est considéré surtout comme une ressource, en ce sens qu'il représente un environnement susceptible de stocker temporairement de l'eau et des nutriments pour faire pousser les cultures. Dans la région soudano-sahélienne du Mali, 18 types de sols ont été identifiés selon les critères suivants : inondation, profondeur, présence de gravillons et texture. Les caractéristiques pédologiques sont dérivées du PIRT (1986a, b,c) et sont décrites plus en détail dans la [section 6.2](#).

Les cultures

Les caractéristiques utilisées pour quantifier la production potentielle de quinze cultures sélectionnées sont : le cycle de croissance minimum et maximum, la durée des stades du développement, les paramètres définissant la fraction de biomasse par rapport aux composants des cultures, les teneurs en éléments nutritifs, ainsi que les paramètres spécifiques des cultures étudiées pour en évaluer la production lorsque l'eau est le facteur limitatif (selon Tanner & Sinclair, 1983). Les données spécifiques des cultures sont dérivées de Van Duivenbooden *et al.*, (1991), Van Duivenbooden (1992), Purseglove (1974, 1975) et [Penning de Vries & Djitéye \(1982\)](#).

Les niveaux de production

Quatre niveaux de production cibles ont été distingués : extensif, semi-extensif, semi-intensif et intensif. Tous diffèrent en ce qui concerne le rendement, le niveau de mécanisation, l'efficacité de recouvrement des nutriments, et l'application d'une période de jachère. On suppose qu'au niveau intensif, le rendement des activités pluviales peut approcher les 80 % d'un rendement limité par la disponibilité en eau. On suppose aussi qu'encore 20 % des rendements sont perdus du fait des maladies ou des parasites. Au niveau extensif, le rendement est surtout déterminé par la disponibilité en éléments nutritifs selon [Penning de Vries & Djitéye \(1982\)](#). Le niveau de production semi-extensif donne des rendements de 20 % supérieurs au niveau de production extensif, du fait de l'utilisation de la traction animale pour la préparation des champs (Van Duivenbooden *et al.*, 1991). Le niveau semi-intensif figure entre l'intensif et le semi-extensif.

Le niveau de production détermine en outre les opérations effectuées, le type d'équipement utilisé, les besoins en main d'oeuvre et si la traction animale est exploitée. On suppose que les niveaux de production plus intensifs (= supérieurs) intègrent davantage de traction animale que les autres. On suppose en outre que, pour les niveaux de production moins intensifs, les pertes de nutriments sont plus élevées du fait des conditions de croissance moins favorables. Une période de jachère pour les niveaux de production extensifs est défini comme une source additionnelle de matière organique en vue de maintenir le taux de cette dernière dans le sol.

L'utilisation des résidus

Ce critère détermine la manière d'exploiter les résidus des récoltes. Six stratégies ont été définies : (i) l'enfouissement, pour approvisionner le sol en matière organique, (ii) le paillage pour réduire l'érosion du sol et approvisionner le sol en matière organique, (iii) le brûlage sur le champ, (iv) la production de litière, (v) le transport des résidus de récoltes à la ferme pour l'affouragement du bétail, i.e. pour l'activité d'élevage, ou (vi) le broutage des résidus de récolte comme fourrage sur le champ même pour les besoins de l'élevage.

Les mesures de conservation de l'eau et du sol

Trois techniques de culture susceptibles d'influencer les ruissellements ont été distinguées : à plat, billon simple et billon cloisonné, les deux dernières étant appliquées pour réduire les écoulements. Les mesures de conservation de l'eau et du sol affectent l'infiltration d'eau et partant, la production potentielle de cultures limitée par la disponibilité en eau. De plus, ces techniques ont un impact sur l'érosion du sol.

Théoriquement, les 15 sous-zones, les 2 types de pluviosité, les 18 types de sol, les 15 types de cultures, les 4 niveaux de production, les 6 types d'utilisation des résidus et les 3 mesures conservation de l'eau et du sol peuvent être combinés. Il en résulte 544.320 activités culturelles différentes. Toutes les combinaisons ne sont cependant pas possibles. Par exemple, certaines combinaisons de sous-zones et cultures sont impraticables au regard des disponibilités limitées en eau pour assurer la croissance des cultures dans ces sous-zones. Par ailleurs, les cultures inondées ne poussent que sur certains sols inondables, et pas toutes les cultures peuvent être combinées à tous les niveaux de production, d'utilisation de résidus ou à toutes les mesures de conservation de l'eau et du sol. Les intrants et extrants ont été quantifiés pour les combinaisons possibles. Pour un sol donné, les intrants comprennent le MOST, N, P et K, la main d'oeuvre, les boeufs de labour et le capital. Les extrants comprennent le produit principal, le résidu, l'infructuosité à la ferme en terme de MOST, le N, P et K de l'infructuosité à la ferme et la capacité de récupérer l'azote. Le tableau 6.11-présente cinq exemples d'activités en relation avec le sorgho comme produit principal, et qui diffèrent en ce qui concerne le type de sol, le niveau de production, d'utilisation des résidus et de mesures conservation de l'eau et du sol.

Comme mentionné dans l'introduction (6.3.1), les activités culturelles sont définies comme un objectif à atteindre, c'est à dire qu'on détermine en premier lieu les rendements (extrants), puis les besoins qui leur sont liés (intrants). Cette approche peut être illustrée sur la base de la culture du sorgho (tableau 6.11). La production limitée par la disponibilité en eau est tout d'abord estimée sur la base des quantités d'eau disponibles. Les précipitations (distribution), les caractéristiques pédologiques et les mesures de conservation de l'eau et du sol déterminent les écoulements et l'infiltration d'eau, déduction faite des pertes par évaporation et percolation. Sur la base de l'eau disponible, des paramètres spécifiques des cultures et du déficit de pression de vapeur, on fait l'évaluation de la biomasse totale à l'aide de la méthode décrite par Tanner & Sinclair (1983). La biomasse est corrigée pour tenir compte des pertes inévitables dues à un apport suboptimal d'eau au début et à la fin de la saison de croissance ainsi que des pertes dues aux maladies et aux parasites. Utilisant des coefficients de fractionnement spécifique aux cultures, la biomasse est répartie en fonction des composants de la culture, les grains, les infructuscences, les feuilles, les tiges et les racines. L'extrait « produit principal » comprend les grains, l'extrait « résidus » comprend les feuilles et les tiges, tandis que les infructuscences sont transformées en extrait « MOST ». Sur la base des teneurs en nutriments des infructuscences, on peut estimer les quantités de N, P et K comme extrants séparés (voir tableau 6.11). La « capacité de récupérer l'azote » représente la quantité de N pouvant être immobilisée par les composants infructuscences relativement pauvres en azote. Cet extrait peut être utilisé dans l'activité de production de litière comme intrant pour immobiliser l'azote de l'urine des animaux des activités d'élevage.

Tableau 6.11 Quelques exemples de coefficients d'intrants et d'extrants pour 5 activités de culture du sorgho dans la sous-zone SZ_37 (Koutiala) dans des conditions de pluviosité normale.

Critères de définition	unité	Valeurs des critères de définition				
		LIAR	LIAR	LIAR	GR	GR
sol						
culture		sorgho	sorgho	sorgho	sorgho	sorgho
technique de production		semi-intensif	semi-intensif	semi-extensif	semi-intensif	semi-intensif
utilisation des résidus		libre ¹⁾	libre ¹⁾	libre ¹⁾	libre ¹⁾	paillage
mesures conservation de l'eau et du sol		absentes	cloison	cloison	cloison	cloison
extrants:						
produit principal	kg ha ⁻¹	2475	3065	1039	2003	2003
résidus (champ)	kg ha ⁻¹	4339	5370	2420	3514	0
MOST (ferme)	UMO ha ⁻¹	41	50	22	33	33
N (ferme)	kg ha ⁻¹	2	2	1	2	2
P (ferme)	kg ha ⁻¹	0	0	0	0	0
K (ferme)	kg ha ⁻¹	8	10	4	6	6
capacité de récupérer l'azote	kg ha ⁻¹	5	6	2	4	4
intrants:						
MOST	UMO ha ⁻¹	117	146	152	131	5

N	kg ha ⁻¹	94	138	69	161	152
P	kg ha ⁻¹	5	6	2	4	3
K	kg ha ⁻¹	53	81	37	105	78
main d'oeuvre :						
1. amendements matière organique	hj ha ⁻¹	2	2	1	1	10
2. préparation	hj ha ⁻¹	10	21	19	20	20
3. semis	hj ha ⁻¹	2	6	5	5	5
4. entretien-1	hj ha ⁻¹	15	20	20	20	20
5. entretien-2	hj ha ⁻¹	27	31	18	26	26
6. récolte	hj ha ⁻¹	26	32	14	22	22
7. hors récolte	hj ha ⁻¹	2	2	1	1	1
8. reste	hj ha ⁻¹	55	30	13	26	33
boeufs de labour	bj ha ⁻¹	19,3	9,6	8	9,1	9,1
monétaire	F cfa ha ⁻¹	30.170	9802	5010	8640	7260

¹⁾ signifie que les résidus de récolte peuvent être utilisés pour l'enfouissement, le brûlage ou le transport des résidus à la ferme

Les intrants sont ensuite calculés. Les besoins en matière organique en terme de MOST sont décrits au [paragraphe 4.3.1](#). L'intrant « MOST » est requis pour maintenir le taux de matière organique du sol au niveau cible. On a constaté que les taux cibles sont plus élevés que les taux courants (6.2). Une exigence similaire doit être satisfaite pour les nutriments N, P et K dont le retrait annuel doit être compensé par des apports internes et externes. En conséquence, on calcule la quantité de nutriments absorbée par la culture et retirée du champ, plus les pertes dues à l'érosion du sol. Cet export de nutriments doit être compensé par des processus d'apports afin de garantir la durabilité du système de production. L'apport de nutriments d'origine naturelle dépend de plusieurs processus : dépôts humides et secs, fixation biologique, et eau d'inondation. Ces apports subissent aussi des pertes par l'effet de processus tels que la dénitrification, la volatilisation, le lessivage et l'érosion, dépendant eux-mêmes des précipitations, du type de sol et de culture, du niveau de rendement, des mesures de conservation de l'eau et du sol, et si les nutriments dérivent d'un matériau organique ou anorganique. On estime par exemple que l'azote d'origine organique est sujet à de plus grandes pertes que celui des fertilisants anorganiques. La différence entre l'export de nutriments et son apport par des voies naturelles permet de quantifier le bilan des éléments nutritifs du système. Un bilan déficient, i.e. l'export de nutriments est supérieur à l'apport, doit être compensé par un import de matière organique et/ou de fertilisants, également soumis au même processus de pertes que les nutriments d'origine naturelle. En divisant le déficit en nutriments par le complément de la fraction perdue, on obtient les besoins en éléments nutritifs d'une activité culturale spécifique.

Huit périodes ont été définies pendant lesquelles l'exécution de certaines opérations dans les champs exigent main d'oeuvre et boeufs de labour. Pour ces opérations, un temps de travail définit le nombre d'homme-jour et d'attelage-jour requis pour chacune d'elle, y compris les déplacements nécessaires (Van Duivenbooden *et al.*, 1991 ; PIRT 1983a,b,c ; Van Heemst *et al.*, 1983). Certaines opérations sont fonction du niveau de rendement (par ex. la récolte), d'autres sont fonction de la superficie (par ex. le labourage). En comparant les jours

disponibles dans chaque période aux besoins en main d'oeuvre et en traction animale des opérations pour chacune des périodes, on peut identifier les pointes saisonnières. Pour simplifier, seul le total des besoins annuels en animaux figure au tableau 6.11.

Les intrants monétaires des activités de culture comprennent le capital et les coûts des consommables. Le premier inclut les coûts de la traction animale (paire de boeufs et d'ânes), les outils (multiculteur, semoir, charrette, chariot, herse et pulvérisateur) et les cordons pierreux. Les coûts annuels du capital tiennent compte de l'amortissement et des frais d'entretien. Les intrants consommables comprennent les coûts des fertilisants N, P, et K, les semences et les biocides. Pour cet intrant aussi, l'approche ciblée est évidente : la définition du niveau de rendement, plus particulièrement les nutriments retirés du système et devant être compensés par des fertilisants est un préalable à la détermination des frais liés aux consommables. Même si l'approche peut sembler quelque peu artificielle, elle constitue un moyen vérifiable de développement et de conception de systèmes de production durable, permettant une analyse intégrée des objectifs de développement du modèle-PLBM.

6.3.3. Les activités d'élevage

Pour une partie de la population de la région soudano-sahélienne, l'élevage est le moyen principal de subsistance. A cet égard, la qualité médiocre du fourrage est un problème essentiel. La qualité et la quantité de fourrage déterminent la production potentielle des troupeaux. Comme l'illustre la [figure 6.5](#), l'intégration des systèmes de production agricole et animale peut contribuer à améliorer la situation fourragère et, partant, la productivité animale. L'approche choisie de quantifier les activités d'élevage tient explicitement compte des disponibilités et de la qualité de la production fourragère régionale.

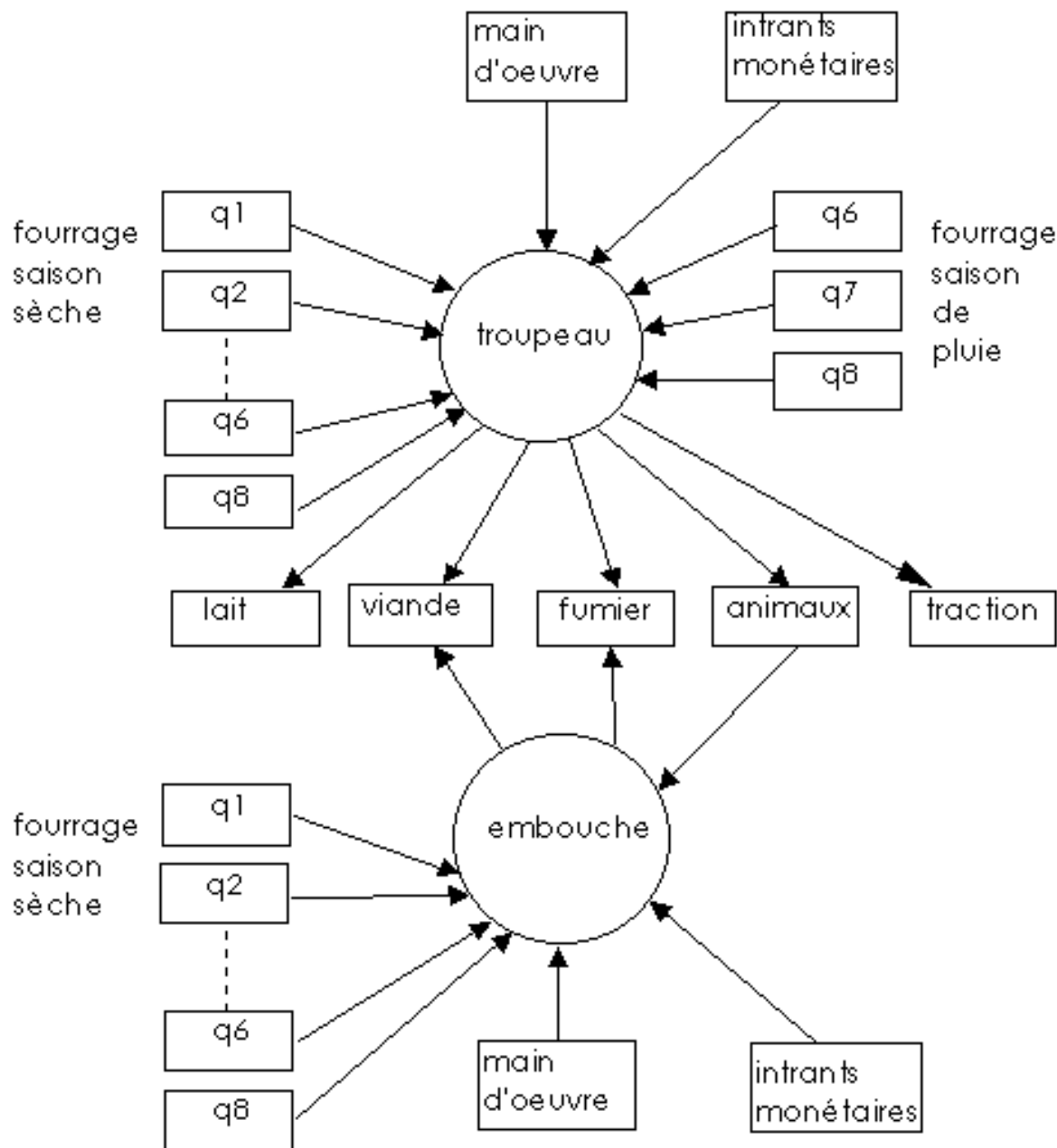


Figure 6.7. Intrants et extrants des activités d'élevage.

Une activité d'élevage est définie comme la combinaison spécifique d'intrants (aliments, main d'oeuvre et capital), résultant d'une combinaison unique d'extrants (viande ou poids vif, lait, fumier et traction). Quatre espèces animales ont été définies et les matrices intrants-extrants correspondantes déterminées et intégrées au modèle PLBM : bovins, caprins, ovins et asins. Pour simplifier, la description des activités animales a été restreinte dans cette section à celle liées aux bovins. Les relations intrants-extrants des autres espèces animales sont essentiellement dérivées de la même manière. Voir [Bakker et al., \(1996\)](#) pour une description plus détaillée de toutes les activités d'élevage. L'élevage pris en compte est l'élevage plus ou moins sédentaire ; un troupeau ne quitte pas sa sous-zone ; la transhumance n'est pas offerte comme choix.

Deux types d'activités bovines ont été définies. Celles relative à la reproduction du troupeau, c'est à dire l'élevage d'un troupeau composé de mâles, de femelles et de veaux. Ces types d'activités d'élevage poursuivent des objectifs mixtes, l'accent étant mis sur la production de poids vif (viande), de lait, ou de traction animale, avec le fumier comme sous-produit. Un autre type est celui d'embouche pour la production intensive de viande.

Les deux types d'activités sont liés, en ce sens que les animaux superflus des troupeaux peuvent être utilisés pour l'embouche. Un schéma des intrants et extrants, ainsi que des interrelations entre les deux types d'activités est présenté à la figure 6.7. Les fourrages sont répartis en 8 catégories de qualité (q1 à q8) et, pour les activités d'élevage de troupeau, en 2 saisons. Les extrants produits par ces activités sont la viande et le fumier pour les deux types, le lait et la traction dans l'élevage de troupeau, et les animaux d'embouche. Le calcul des intrants et extrants est basé sur une approche élaborée par [Bakker *et al.*, \(1996\)](#). Les relations à la base des calculs sont d'une part, la qualité fourragère et l'ingestion volontaire d'un bovin, et d'autre part l'ingestion et la croissance pondérale.

6.3.3.1. L'élevage de troupeau

L'unité considérée dans ce type d'activité est le troupeau. Un troupeau est constitué de catégories d'animaux d'âge et de sexes différents. Douze catégories d'âge (0 an à 11 ans) et deux catégories de sexe (mâle et femelle) ont été distinguées. La structure d'un troupeau est définie par la répartition du nombre total d'animaux entre ces différentes classes. Cette distribution dépend de plusieurs facteurs, tels que la vitesse de croissance, la mortalité, la stratégie de vente, la vitesse de reproduction, etc. La quantification des intrants et extrants des activités troupeau se fait sur la base d'une année. La stratégie de vente définit l'âge de vente de tous les mâles et des génisses qui ne sont pas nécessaires pour la reproduction. La dernière catégorie d'animaux vendus est celle de vaches âgées (11 ans). La stratégie de vente veille au maintien de la stabilité du troupeau, c'est-à-dire qu'à la fin de l'année, le troupeau doit avoir la même taille et la même structure qu'au début de l'année. On assure ainsi la continuité de cette ressource qu'est le troupeau.

Une distinction a été faite entre 4 niveaux de production, correspondant à 4 niveaux d'alimentation (tableau 6.12), et 4 menus fourragers de différentes qualités (le tableau II.4.3.3.2b montre comment un de ces menus peut être composé sur la base de toute une série de combinaisons des fourrages de qualité différente). Le niveau d'alimentation de 1,05 mène au niveau de production 1 ; 1,1 au 2 ; 1,15 au 3 et 1,2 au 4. Chaque menu est caractérisé par son niveau d'alimentation, qui décrit la fraction nécessaire d'énergie ingérée du menu, pour assurer l'entretien d'un troupeau. Un troupeau auquel un menu d'un niveau alimentaire 1,00, c'est-à-dire le niveau d'entretien, est administré, ne produit donc rien. Plus le niveau alimentaire est haut plus la productivité des animaux est élevée.

Pour un niveau d'alimentation donné, la différence entre les trois objectifs lait, viande et traction se reflète dans la stratégie de vente. Trois stratégies de vente sont considérées. Si le but principal est la production de lait, tous les veaux qui ne sont pas nécessaires au maintien du troupeau sont vendus aussitôt que possible (12 mois). Si l'objectif principal de production est la viande, les veaux sont maintenus dans le troupeau pendant 2 ou 3 ans, d'abord pour l'engraissement, ensuite pour la vente. La dernière stratégie, la vente des mâles à l'âge de 6 ans et des femelles à l'âge de 4 ans, vise à augmenter la fraction de mâles de trois ans ou plus dans le troupeau. C'est cette fraction qui est utilisable en tant que boeufs de labour dans les activités culturelles.

Ainsi, 12 activités de troupeau ont été définies en combinant 4 niveaux d'alimentation et 3 stratégies de vente. Les activités définies donnent différents niveaux de production de viande, de lait et d'animaux de traction (tableau 6.12). En plus de la production indiquée, il est également tenu compte d'un type d'extrait, à savoir que les animaux vendus qui n'ont pas encore atteint leur poids maximum sont utilisables comme intrants dans les activités d'embouche (voir aussi [6.3.3](#)).

Tableau 6.12 Définitions et production annuelle des activités de troupeau.

activité	NA ¹⁾	stratégie de vente	poids vif (kg UBT ⁻¹)	lait (kg UBT ⁻¹)	boeuf de labour ²⁾ (animal UBT ⁻¹)	MOD ³⁾ (kg MOD UBT ⁻¹)
1	1,05	lait	31	77	0,0	1062
2	1,05	viande	36	69	0,0	1069
3	1,05	traction	29	47	0,0	1005
4	1,10	lait	51	149	0,0	1089
5	1,10	viande	56	122	0,0	1089
6	1,10	traction	39	71	0,0	967
7	1,15	lait	70	208	0,0	1112
8	1,15	viande	73	161	0,0	1096
9	1,15	traction	47	83	0,3	933
10	1,20	lait	80	261	0,0	1105
11	1,20	viande	82	189	0,0	1080
12	1,20	traction	50	91	0,3	891

¹⁾ NA=Niveau d'Alimentation, exprimé en ingestion de matière organique digestible (MOD) par rapport à celle au niveau d'entretien;

²⁾ Boeufs de Labour qui peuvent être utilisés dans les activités culturelles;

³⁾ MOD=Besoin en matière organique digestible.

6.3.3.2. Qualification et quantification des intrants fourragers

Huit catégories de qualité ont été distinguées. Chacune d'elles s'accompagne de caractéristiques telles que la digestibilité et le niveau d'alimentation, ainsi que des aliments liés à ces caractéristiques (tableau 6.12). Le niveau alimentaire correspond à la digestibilité qui reflète à son tour à la teneur en azote des fourrages. Le niveau alimentaire d'un fourrage indique le niveau d'ingestion de MOD (exprimé comme fraction du niveau d'entretien du troupeau) qui serait atteint si le troupeau était nourri seulement avec ce type de fourrage. Les fourrages sont fournis par les pâturages, les activités culturelles et l'achat de tourteau de coton.

Tableau 6.12 Les différentes qualités de fourrage utilisées.

Q ¹⁾	NA	DMO ²⁾ (%)	aliments en saison sèche	aliments en saison de pluies
1	0,25	35	pâturage N<4 g kg ⁻¹ MS	
2	0,50	40	pâturage N : 4-6 g kg ⁻¹ MS	
3	0,75	45	pâturage N : 6-8 g kg ⁻¹ MS, <i>Andropogon</i> paille de mil, sorgho, maïs	

4	1,00	50	pâturage N 8-10 g kg ⁻¹ MS, feuilles de mil, de sorgho, de maïs, d' <i>Andropogon</i> , paille de riz	
5	1,25	55	pâturage N : 10-13 g kg ⁻¹ MS, fanes de niébé, arachide, paille de riz traité	
6	1,50	60	pâturage N>13 g kg ⁻¹ MS bourgou ; verano	pâturage N<16 g kg ⁻¹ MS
7	1,75	65		pâturage N 16-22 g kg ⁻¹ MS
8	2,00	70	tourteau de coton	pâturage N>22 g kg ⁻¹ MS

1) Q = classe de Qualité du fourrage;

2) DMO = Digestibilité de la Matière Organique.

Pour chaque activité de troupeau le niveau alimentaire détermine le niveau moyen du menu fourrager nécessaire pour atteindre la production du troupeau indiqué. On constate que, comme pour les activités culturales, l'approche ciblée est également applicable aux activités d'élevage : on détermine d'abord la production à atteindre en se basant sur un niveau alimentaire bien défini. Ce niveau peut être atteint avec plusieurs combinaisons de fourrages de différentes qualités. Une telle combinaison est baptisée « stratégie fourragère ». Un exemple des besoins en fourrage de différentes qualités pour les différentes stratégies fourragères est donné pour le niveau d'alimentation 1,10 fois celui d'entretien dans le tableau 6.13.

Les besoins en intrants monétaires et en main d'oeuvre pour l'exécution des activités sont indiqués au tableau 6.14. La main d'oeuvre doit être fournie pendant toutes les périodes de l'année. Aux besoins en main d'oeuvre s'ajoute encore le temps de traite qui a été estimé à 10 minutes par kg de lait. Ce chiffre est basé sur les données présentées par Van Duivenbooden *et al.*, (1991).

Tableau 6.13 Besoins en fourrage (en kg MS) par stratégie fourragère et par saison, pour un niveau d'alimentation de 1,10.

Stratégies fourragères	Besoins en fourrage (kg animal-1)							
	En saison de pluies	En saison sèche par niveau de qualité						
		1	2	3	4	5	6	8
25	522	196			890			
26	522	514				607		
27	522	704					445	
28	522	922						272
29	522		257		822			
30	522		599			498		
31	522		770				342	
32	522		942					196
33	522			457	616			

34	522			799		280		
35	522			913			171	
36	522			1004				88

Tableau 6.14 Intrants monétaires (* 1000 F cfa animal⁻¹) et en main d'oeuvre (homme animal⁻¹) par niveau de production et par année.

niveau de production	1	2	3	4
main d'oeuvre	0,015	0,025	0,03	0,035
intrants monétaires	0	2	3	4

6.3.3.3. L'embouche

Les activités d'embouche ont été définies sur la base de la pratique en saison sèche (décembre à mai), période où les animaux en bon état se font plus rares et où le niveau de prix sur les marchés aux bestiaux est assez élevé. Ces activités utilisent donc seulement le fourrage et la main d'oeuvre en saison sèche. La durée de l'embouche est de 6 mois. Elle est réalisée en stabulation fixe à l'étable. Il s'ensuit que les animaux n'ont pas d'accès aux pâturages naturels. Les sources alimentaires à leur disposition sont les sous-produits agricoles et les suppléments achetés (le tourteau de coton).

Pour l'embouche, 6 types de bovins cibles sont considérés : jeunes < 100, mâles de 200 kg, femelles de 200 kg, mâles 300 kg, femelles de 300 kg, mâles de 400 kg.

Trois niveaux d'alimentation ont été retenus. Ce sont les niveaux correspondant à 1,25 ; 1,5 et 1,75 fois le besoin d'entretien d'un animal. Ainsi 18 activités de production de viande sont distinguées. Elles sont présentées au tableau 6.15 avec leur productivité (gain de poids) et leur besoin total en MOD. Les besoins fourragers pour atteindre un certain niveau de production peuvent être satisfaits de différentes manières, c'est-à-dire en utilisant différentes stratégies fourragères. Sur les 8 catégories de qualité qui ont été définies pour les seules activités de troupeau, celles qui concernent les aliments de saison sèche ont été adoptées pour l'embouche. Les besoins en intrants monétaires pour les niveaux d'alimentation 1,25 ; 1,5 et 1,75 sont respectivement de 2000, 4000 et 6000 F cfa animal⁻¹. Ces intrants couvrent l'infrastructure et les soins vétérinaires de la période de 6 mois. Le besoin en main-d'oeuvre est estimé à 0,05, 0,06 et 0,07 homme animal⁻¹.

Tableau 6.15 Définitions et productivité des activités d'embouche.

activité.	NA	sexe	poids initial (kg)	ingestion (kg MOD)	gain de poids (kg)
1	1,250	m/f	100	338	52
2	1,250	m	200	454	45

3	1,250	m	300	545	35
4	1,250	m	400	622	26
5	1,500	m/f	100	457	101
6	1,500	m	200	556	86
7	1,500	m	300	630	68
8	1,500	m	400	686	49
9	1,750	m/f	100	568	144
10	1,750	m	200	653	123
11	1,750	m	300	711	98
12	1,750	m	400	746	71
13	1,250	f	200	446	41
14	1,250	f	300	515	23
15	1,500	f	200	533	76
16	1,500	f	300	565	42
17	1,750	f	200	605	103
18	1,750	f	300	605	57

6.3.4. Les activités de transformation

Les activités de transformation supportent les activités de culture et d'élevage par la production et la transformation des sous-produits dont elles ont besoin. Les activités de transformation peuvent être subdivisées en :

- activités produisant des sous-produits comme extrant principal (jachère et pâturage) ;
- activités transférant les sous-produits d'une activité vers une autre activité (transport de résidus à la ferme et de matière organique au champ) ;
- activités représentant des stratégies d'utilisation des résidus de récolte (paillage, enfouissement, brûlage, production de litière).

Ces dernières transfèrent la MOST, les résidus de récolte et les nutriments vers diverses activités générant des produits consommables (culture et élevage), comme l'illustre la [figure 6.6](#). Les critères de définition et les intrants et extrants de ces activités de transformation sont indiquées au tableau 6.9.

6.3.4.1. La jachère

L'activité de jachère produit la MOST et les nutriments qui peuvent être utilisés comme intrants dans les activités culturelles. On suppose que la biomasse produite pendant une année de jachère dépend des nutriments les plus limitatifs N, P ou K. La disponibilité de ces nutriments est déterminée par l'apport annuel d'origine naturelle (précipitations, fixation microbienne et altération). Connaissant les concentrations minimums de

nutriments dans les végétations de jachère, on peut déterminer la production de matière organique d'une année de jachère. En réalité cependant, l'eau est devenue le facteur le plus limitant souvent, vu que les sols soudano-sahéliens sont tellement épuisés et, par conséquent, dégradés, que le ruissellement est fort.

On suppose que la végétation de jachère n'est pas broutée par le bétail. En réalité, ceci implique que main d'oeuvre et capital (clôtures) sont requis pour protéger la jachère. Il n'est cependant pas tenu compte de ces besoins. De plus, on suppose qu'il ne se produit aucune accumulation de biomasse au fil des ans, tandis qu'en réalité, la production de biomasse d'une végétation de jachère augmente du fait de la constitution de ressources naturelles (nutriments et matière organique dans le sol).

6.3.4.2. Le pâturage

L'activité de pâturage produit différentes qualités de fourrages qui sont utilisés comme intrants dans les activités d'élevage, ainsi que du bois (des espèces ligneuses) qui peut être utilisé pour la cuisson (bois de feu).

La méthode utilisée pour déterminer la production fourragère est basée sur le modèle décrit par [Breman & De Ridder \(1991\)](#). Ces derniers ont estimé la fraction de biomasse qui peut être exploitée sans menacer la production à la longue, dans des situations où l'azote est le facteur de croissance le plus limitant. Dans cette méthode, la production de biomasse dépend de la dynamique de l'azote dans le système pastoral. Le N disponible dépend de l'apport annuel d'origine naturelle (précipitations), des caractéristiques pédologiques (texture du sol, profondeur et position dans la toposéquence) et du recouvrement des espèces ligneuses. La production fourragère est répartie en classes de qualité en fonction de sa teneur en N et en MOD. Ces différentes classes de qualité sont utilisées dans les rations alimentaires décrites au [paragraphe 6.3.3.2](#).

6.3.4.3. Le brûlage des résidus

Par l'activité de brûlis, les résidus des récoltes sont transformés en éléments nutritifs qui peuvent entrer ensuite dans la même activité ou dans une autre activité culturale sur le même type de sol. Outre les résidus, le seul intrant est la main-d'oeuvre. Elle est utilisée pour l'arrachage des résidus avant brûlis pendant la période de préparation du champ.

Les extraits sont les éléments nutritifs P et K, en fonction de leur teneur respective dans le résidu. On suppose que le carbone qui reste après brûlage n'est pas actif et qu'il ne contribue pas à la restitution de la matière organique du sol. On suppose également que tout N se perd pendant le brûlis.

6.3.4.4. L'enfouissement des résidus

Cette activité a pour objet d'enfouir les résidus de récolte dans le sol de sorte à favoriser leur transformation en MOST et en éléments nutritifs. Ces activités peuvent être effectuées avec des résidus du mil, du sorgho, du maïs, du coton, du niébé, du niébé fourrager et de l'arachide. L'extrait des activités d'enfouissement - la MOST et les éléments nutritifs - peuvent être utilisés dans le modèle PLBM dans les activités culturales (comme intrant) autres que celles dont les résidus sont dérivés. Il faut cependant que les cultures proviennent de la même sous-zone et du même type de sol. Ainsi, les résidus (MOST) d'une activité culturale peuvent contribuer à satisfaire les besoins de matière organique du sol liés à une autre activité culturale.

Les intrants « main d'oeuvre » et « boeufs de labour » sont utilisés dans la période hors récolte. La période hors récolte s'étale jusqu'à 20 jours après la récolte, en supposant que le sol soit encore assez humide pendant cette période pour pouvoir être labouré. L'intrant « capital » est nécessaire pour l'amortissement du multiculteur.

6.3.4.5. Le paillage

L'activité de paillage ('mulching') sert deux objectifs : protéger le sol contre l'érosion et satisfaire les besoins en matière d'organique des activités culturales. Le paillage transforme les résidus des activités culturales en MOST et en éléments nutritifs (N, P and K).

Le paillage ne peut être réalisé qu'avec des résidus de mil, de sorgho, de maïs et de coton. De plus, les résidus de récolte d'une activité culturale ne peuvent pas être utilisés par les autres activités culturales. Les besoins en main d'oeuvre pour le paillage sont définis pour la saison hors récolte. Ils ne concurrencent pas les autres travaux au champ.

6.3.4.6. La production de litière

L'activité de la production de litière exploite les résidus exportés des champs vers la ferme où ils sont mélangés avec des excréments afin de réduire les pertes d'azote pendant leur stockage et leur décomposition. Le type de récolte détermine la transformation en MOST. Dans le modèle-PLBM la production de litière est limitée à la sous-zone où les résidus ont été prélevés.

L'intrant « main-d'oeuvre » est nécessaire à la distribution des résidus comme litière. Les extrants sont la MOST et les éléments nutritifs qui se trouvent dans les résidus et la capacité d'immobiliser l'azote volatile des excréments.

6.3.4.7. Le transport des résidus à la ferme

Les activités de transport emmènent les résidus des récoltes à la ferme où ils peuvent être utilisés comme fourrage ou litière. En ce qui concerne le mode de transport, l'un des critères de définition comprend deux options : charrette tirée par un âne ou dos d'homme. Les deux options ont besoin de main d'oeuvre, et de capital pour l'amortissement de la charrette et des ânes. L'extrait est le même résidu qui se trouve maintenant à la ferme.

6.3.4.8. Le transport de matière organique au champ

Cette activité consiste à apporter la matière organique (y compris les nutriments qu'elle contient) de la ferme au champ. La matière organique, exprimée en termes de MOST, est issue des activités culturales (infructuscences), des activités d'élevage, et de la production de litière.

Deux types de transport sont définis : à dos d'homme ou par charrette tirée par un âne. Les autres intrants sont la main d'oeuvre pour le transport en charrette et le capital pour l'amortissement de la charrette et des ânes. Les éléments nutritifs sont transportés en même temps que la MOST, au travers du fumier. L'extrait de cette activité de transport est également l'unité de matière organique standard qui se trouve maintenant sur le champ.

6.3.5. Le générateur de coefficients techniques (GCT) du projet PSS

6.3.5.1. Introduction

La description suivante du Générateur des Coefficients Techniques (GCT) du projet PSS doit aider l'utilisateur surtout à examiner et à employer le GCT. Il peut s'avérer un peu plus difficile d'introduire des changements. Le GCT est un outil qui vise à estimer d'une façon raisonnée et consistante les productions ou extrants et les besoins en intrants pour les différents types d'activités agro-sylvo-pastorale. Par le terme <coefficients techniques> on réfère dans ce document aux estimations quantifiées des intrants et extrants. Ce terme est un terme de l'économiste qui ainsi oppose les sciences humaines aux autres sciences, qu'il appelle « techniques » (p.ex. l'agronomie, le zootechnique). A l'aide des connaissances sur ces sciences, l'économiste essaie d'analyser des systèmes sous l'influence de l'homme. Dans notre cas cela se fait avec le modèle PLBM.

Le GCT est écrit à l'intérieur du logiciel EXCEL (version 4), un produit de MicroSoft. Pour l'utilisation du GCT une certaine connaissance de base du logiciel EXCEL est requise (ouvrir des fichiers, changer de fenêtre, entrer une valeur dans une cellule donnée, parcourir et examiner un fichier à l'aide des flèches ou la souris, choisir des options du menu, etc.). Pour pouvoir comprendre les formules en détail, une très bonne connaissance d'EXCEL est indispensable, mais probablement pas suffisant. Comme les formules employées et la justification de celles-ci sont présentées dans les rapports de recherche de l'Equipe Modélisation des Systèmes du projet PSS, il est conseillé à ceux qui aiment connaître les formules en détail de se référer à ces documents.

Dans la suite la plupart des paragraphes sont divisés en deux parties, dont la première est consacrée aux explications d'ordre général sur le GCT. La deuxième partie a le caractère d'un manuel d'emploi et précise comment l'utilisateur peut employer les possibilités du GCT et comment profiter des procédures automatisées.

6.3.5.2. Les types d'activités

Le GCT peut être utilisé pour 18 types d'activités chacun avec sa propre code. Le GCT d'un type d'activité donné fournit une estimation quantitative de la production et des intrants utilisés pour les différentes activités de ce type. Pour être informé sur le caractère de chaque type d'activité et pour les liens entre les différents types d'activité, référer aux documents suscités du projet PSS. Les types d'activité avec leurs codes sont les suivants :

code Type d'activité

CUL : CULTures pluviales

CIN : Cultures INondées

PAT : PATurage

SYL : SYLviculture

JAC : JACHère

FOC : FOurrage au Champ (résidus de récolte)

BRU : BRUlage des résidus de récolte au champ

ENF : ENFouissement des résidus de récolte au champ

TRF : Transport des Résidus (du champ) à la Ferme

FOF : FOurrage à la Ferme (résidus de récolte)

LIT : LITière : mélanger résidus de récolte avec fumier

TFC : Transport du Fumier (de la ferme) au Champ

BOV : élevage des BOVins en troupeau

CAP : élevage des CAPrins en troupeau

OV : élevage des OVins en troupeau

BL : Boeufs de Labour

MB : élevage d'eMBouche bovin

SFT : Stratégies Fourragères pour l'élevage en Troupeaux (BOV, CAP et OV)

SFM : Stratégies Fourragères pour l'élevage d'eMbouche (MB)

ENG : apport des ENGraiss chimiques

6.3.5.3. Les fichiers de calcul principaux et les fichiers auxiliaires

Pour chaque type d'activité il y a un fichier de calcul principal, du nom INEX_act.XLS, « act » étant le code du type d'activité correspondant. « INEX » est une abréviation de « INtrants et EXtrants ». Par exemple, pour les activités d'enfouissement le fichier de calcul principal est INEX_ENF.XLS. Il y a neuf fichiers auxiliaires dans lesquels des calculs communs sont faits ou des données communes sont stockées. Ainsi les fichiers auxiliaires réduisent la grandeur des fichiers de calcul principaux. Il s'agit des fichiers suivants :

BESMOEN.XLS : BESoin en Matière organique et engrais

CLIMAT.XLS : Données sur le CLIMAT

CRUES.XLS : Hauteur des CRUES

PRIXMAT.XLS : Données sur les PRIX des MATériaux, animaux, etc.

REND_NO.XLS : RENDement et périodes culturales (année NOrmale)

REND_SE.XLS : RENDement et périodes culturales (année SEche)

SUBSTRAT.XLS : Données sur les SUBSTRATs

TT.XLS : Temps de Transport

VALDEBAS.XLS : VALeurs DE BASE pour les cultures

Il y a trois autres fichiers auxiliaires. Il s'agit de deux fichiers avec des macros (procédures ou fonctions écrit par l'utilisateur), qui complètent le calcul pour certains types d'activité. L'autre fichier contient des listes de valeurs de certains paramètres. Ce fichier (LIST_NOM.XLS) contient entre autres la liste des sous-zones, la liste des substrats, la liste des niveaux d'intensité (voir le tableau 1). En plus, ce fichier contient pour chaque type d'activité la liste des fichiers qui est utilisé pour les calculs.

LIST_NOM.XLS : LISTE des NOMs (valeurs) des variables de définition

F_MAX.XLM : Fichier de Macro, utilisé dans les calculs de la productivité des pâturages

INTERPOL.XLM : Fichier de Macro avec des formules pour faire l'interpolation

6.3.5.4. Préparer et démarrer le GCT

L'installation du GCT se fait en copiant tous les fichiers nécessaires dans le sous-répertoire C:\PSS\GCT. Le nom de ce répertoire est employé dans le GCT, raison pour laquelle il est déconseillé de transférer les fichiers dans un autre répertoire. Le GCT peut être utilisé seulement à l'intérieur du logiciel EXCEL (version 4). Après avoir démarré ce logiciel le fichier de Macro GCT.XLM du sous-répertoire C:\PSS\GCT doit être ouvert. Après l'ouverture de ce fichier un menu apparaît avec quatre boutons, qui peuvent être activés avec le « souris ». Le premier bouton (« ? ») donne une brève explication de ce qu'on peut faire avec les trois autres boutons. Il s'agit de :

- V Voir / examiner /feuilleter les fichiers du GCT pour un type d'activité à choisir
- G Générer des CT pour un type d'activité à choisir
- Info avoir des INFOrmations concernant les CT générés pour un type d'activité à choisir (le nombre d'activités, les variables de définition et les noms et dimensions des variables calculées).

Après avoir activé un de ces trois boutons une liste des différents types d'activité apparaît sur l'écran. On choisit à l'aide du souris ou le curseur et on confirme en appuyant la touche <Enter>.

6.3.5.5. Voir/Examiner les fichiers de calcul et de données de base

Après avoir choisi le type d'activité, tous les fichiers qui sont importants pour les calculs concernant les intrants et extrants de ce type d'activité sont ouverts. Normalement le fichier actif est le fichier principal de calcul (INEX_act.XLS). Si cela n'est pas le cas, on peut l'activer à travers un changement de fenêtre (Window). En tout cas, il est possible de parcourir les différents fichiers, observer les types de calculs faits et les données utilisées et d'observer les formules employées. Normalement on ne voit que les *valeurs* calculées sur l'écran. Seulement pour la cellule active est-il possible de regarder la *formule* employée. Pour connaître la formule de calcul d'une certaine variable il est donc nécessaire d'activer la cellule où le calcul est fait.

Définir une activité

Une activité d'un certain type est définie par la combinaison des valeurs des variables de définition, qui caractérisent l'activité. Pour les activités culturelles (CUL), par exemple, des variables de définition sont, entre autres, le substrat, la sous-zone (qui définit le climat), la culture et le niveau d'intensité. Chaque combinaison de l'ensemble des variables de définition définit une activité. C'est cette combinaison qui donc sert comme « input » pour les calculs. Toutes les variables de définition doivent avoir une valeur pour que le calcul des intrants et extrants puisse être exécuté. Le tableau 2 montre les variables de définition pour les activités de culture pluviale (CUL).

Comment changer les variables de définition

Comme indiqué dans le tableau 2, les variables de définition doivent être manipulées à travers les valeurs contenues dans le vecteur <input>. En activant le menu Formula - Goto et en choisissant le nom <input> de la liste évoquée, on saura, en cas de doute, quelles cellules font partie de <input>. Après des changements de <input> il faut recalculer (appuyez la touche F9). Ainsi, les variables de définition (sous-zone, substrat, etc...) sont calculées à partir de ces valeurs et à l'aide des listes contenues dans le fichier LIST_NOM.XLS. En même temps toutes les autres cellules seront actualisées et les résultats des calculs de tous les fichiers peuvent être examinés. Ainsi on a calculé les intrants et extrants pour une seule activité. La partie clé des résultats est mise

ensemble dans un vecteur du nom <output>, qui contient pour l'activité en question les extrants (p.ex. le rendement) et les intrants (besoin en main d'oeuvre, éléments nutritifs, etc.).

6.3.5.6. Générer les coefficients pour un (grand) nombre d'activités

Dans les fichiers de calcul les résultats pour seulement une activité peuvent être inspecté à la fois. Pour la génération et le stockage des CT pour un (grand) nombre d'activités un autre fichier est employé du nom CT_act.XLS (« act » est le code du type d'activité correspondant au code dans le fichier INEX_act.XLS). La série d'activités définies est stockée dans le fichier DEF_act.XLS.

A partir de la série de combinaisons d'activités la génération des CT est exécutée de façon automatique pour chacune de ces combinaisons de la liste des activités. Dans ce processus une partie sélectionnée des calculs est sauvegardée dans le même fichier CT_act.XLS. Cette partie est un groupe de cellules de INEX_act.XLS qui est appelé <output>. Les résultats finaux de la génération des CT pour la liste d'activités sont constitués par les valeurs contenu dans <input> et <output>. Si on veut avoir d'autres informations qui sont calculées pour les activités, il faut ajouter ces informations à <output>. A part du fichier CT_act.XLS les CT sont aussi stockés dans des fichiers à utiliser par le modèle PL. Chaque fichier contient les données pour un type de donnée, p.ex. la main d'oeuvre, le rendement, la sous-zone, etc.

Comment exécuter le GCT pour un type d'activité

La façon de calculer et de stocker les intrants et extrants pour plusieurs activités est d'activer le bouton <G>. Ensuite on choisit le type d'activité, le répertoire où les fichiers utilisés par le modèle PL seront stockés, et les valeurs des variables de définition. Dans le fichier CT_act.XLS une série de combinaisons des variables de définition est créée de façon interactive : Cela se fait à l'aide des menus pour chaque variable de définition, dans laquelle les valeurs possibles sont visualisées. L'utilisateur choisit les options à inclure dans le modèle. Par exemple, pour les activités de culture, il y a un menu pour la sous-zone, les substrats, les niveaux d'intensité, etc.

Après la génération des CT le fichier CT_act.XLS contient tous les coefficients, ainsi que quelques données principales, comme le nombre total de combinaisons des variables de définition, le nombre de combinaisons pour lequel des calculs ont été faits et le nombre d'activités qui est finalement retenu. Ce sont seulement les CT pour ces activités qui sont stockés dans les fichiers à utiliser par le modèle PL.

6.3.5.7. Exercices pour le Générateur des Coefficients Techniques

0. Démarrer le GCT (démarrer EXCEL 4, et ouvrir le fichier GCT.XLM)

1. Voir et feuilleter les fichiers dans le GCT. Pour tous les exercices suivants on est encouragé de parcourir les différents fichiers.

- a. démarrer le GCT pour l'élevage des bovins Quels sont les fichiers de calcul utilisés ? Dans le fichier INEX_BOV.XLS : Quel est le Niveau d'Alimentation du menu pour l'activité présente ? Quelle est le gain de poids d'une femelle dans sa deuxième année ? Quelle est la taille moyenne du troupeau simulé et quelle est la fraction des mâles ?

b. démarrer le GCT pour la « production » de litière Quels sont les fichiers de calcul utilisés ? Dans le fichier INEX_LIT.XLS : Quelle est la culture dont les résidus sont utilisés pour la litière dans l'activité présente ? Quelle est la quantité de résidus que 10 UBT peuvent broyer dans une nuit ? Est-ce que cette quantité dépend de la culture, selon les calculs ? Pourquoi (pas) ?

c. démarrer le GCT pour la production de culture pluviale en ouvrant aussi le fichier avec des coefficients techniques générés (CT_CUL.XLS). Quels sont les fichiers de calcul utilisés ? Quelle est la sous-zone de l'activité présente ? Quelle est sa pluviométrie moyenne ? Quelle sa pluviométrie en année sèche ? Où trouve-t-on les calculs du rendement de la culture ? Quel est le numéro de suivi de l'activité actuelle selon le fichier CT_CUL.XLS ?

2. Faire des calculs pour quelques activités

a. démarrer le GCT pour la sylviculture.

Quels sont les fichiers de calcul utilisés ?

Comment les intrants monétaires sont-ils calculés ? Quel est l'effet de la superficie d'une parcelle ?

3. Changer des paramètres et recalculer

- poids adulte des bovins

- la superficie de la parcelle pour la sylviculture. Quelle est son influence sur les intrants monétaires ?...

4. Générer des CT pour un nombre d'activités d'un seul type

- Génère les CT pour le transport de fumier dans la sous-zone 24 et pour 4 types de sol de ladite zone ; stockez les dans le répertoire correspondant.

6.4. Restrictions

Les restrictions dans le modèle peuvent être divisées en deux types : les restrictions techniques et les restrictions qui concernent les variables-objectifs. Le premier type de restriction est presque toujours sous forme de bilan qui limite l'exploitation des ressources et des produits intermédiaires par rapport à leur disponibilité totale. Ce type de restriction spécifie donc toujours que la somme des besoins d'utilisation d'une ressource donnée ne peut pas dépasser sa disponibilité totale :

Utilisation totale \leq Disponibilité totale

Une vue globale des différents types de restrictions techniques est donnée au tableau 6.16. Pour chaque ressource ou produit intermédiaire il y est indiqué quelle en est la provenance et quels sont les types d'activité qui l'utilisent. Les sources de provenance sont marquées du signe '+' et les types d'activité qui l'utilisent sont marqués du signe '-'. Par exemple, les résidus de récolte au niveau champ proviennent directement des activités culturales. Ces résidus sont utilisés par les différents types d'activités mentionnées dans le tableau : brûlage, empaillage, enfouissement, fourrage, et transport.

Chaque type de restriction donné dans le tableau correspond à plusieurs restrictions dans le modèle, car la ressource ou le produit intermédiaire peut être subdivisé. Par exemple, il y a des bilans de main d'oeuvre pour chaque combinaison d'une sous-zone et d'une période. Pour le modèle de la zone soudano-sahélienne du Mali qui consiste de 15 sous-zones et qui connaît 30 périodes, 450 (15 x 30) restrictions sont donc formulées pour la main d'oeuvre. Pour le modèle du cercle de Koutiala qui fait partie d'une seule sous-zone climatique, et où on

distingue dix cultures, il y a donc dix bilans de résidus de récolte à la ferme.

Les terres sont subdivisées selon trois critères : la sous-zone, le type de sol et la distance du champ à un point d'eau permanent. Ce dernier critère a été inclus pour mieux estimer la disponibilité des terres pour l'agriculture. L'hypothèse de [Veeneklaas et al., \(1991\)](#) a été utilisée selon laquelle les fractions de terre situées à une distance de plus de 6 km d'un point d'eau permanent n'est pas utilisable pour la culture. Et les fractions de terre qui sont éloignées de plus que 15 km d'un point d'eau permanent ne peuvent même pas être utilisés comme pâturage en saison sèche. C'est ainsi qu'un système de trois types de restriction est obtenu : un pour la superficie totale, un pour la superficie à l'intérieur d'un rayon de 15 km et un pour la superficie à l'intérieur d'un rayon de 6 km. Les superficies estimées par sous-zone sont données dans la [section 4.2](#) sur les ressources.

Le système utilisé pour les restrictions techniques dans le modèle n'a pas été décrit entièrement ici. Par exemple, par rapport au fourrage du bétail il y a dans le modèle une distinction entre la matière organique digestible et la matière sèche. Cette distinction n'a pas été incluse dans le tableau 4.1.2.1. Pour la spécification exacte de la structure technique du premier modèle PLBM, se référer à [Sissoko et al., \(1995\)](#).

Tableau 6.16 Liste des bilans ou des restrictions techniques du modèle PLBM. Pour plus d'explication, voir le texte.

ressource ou produit intermédiaire	subdivision selon	provenance (+) / utilisation (-)	
terre	sous-zone	+	ressource naturelle
	type de sol	-	activités de culture
	distance à point	-	activités de sylviculture
	d'eau permanent	-	jachère
		-	pâturage
main d'oeuvre	sous-zone	+	population dans la sous-zone
	période	+	main d'oeuvre de l'extérieur
		-	presque tous les types d'activité
résidus de récolte (champ)	sous-zone	+	activités de culture
	type de sol	-	brûlage des résidus
	culture	-	enfouissement/ empaillement des résidus
		-	fourrage au champ
		-	transport à la ferme
résidus de récolte (ferme)	sous-zone	+	transport à la ferme
	culture	-	fourrage à la ferme
		-	litière
fourrage (totale)	sous-zone	+	pâturage

	saison	+	fouillage au champ (résidus)
	qualité	+	fouillage à la ferme (résidus)
		+	supplémentation
		-	activités d'élevage
fouillage (ferme, saison sèche)	sous-zone	+	fouillage à la ferme (résidus)
	qualité	+	supplémentation
		-	activités d'élevage
éléments nutritifs (champ)	sous-zone	+	apport d'engrais chimiques
	type de sol	+	jachère
	type de nutriment	+	brûlage des résidus
		+	enfouissement/ empaillement des résidus
		+	élevage (fumier pendant broutage au champ)
		+	transport de fumier de la ferme au champ
		-	activités de (sylvi-)culture
éléments nutritifs (ferme)	sous-zone	+	fumier rassemblé aux parcs ou étables
	type de nutriment	+	litière produite à la ferme
		-	transport du fumier vers le champ
boeufs de labour	sous-zone	+	élevage des bovins en troupeaux avec dressage des boeufs de labour
		-	activités de culture
		-	activités d'enfouissement des résidus
animaux d'embouche	sous-zone	+	élevage des bovins en troupeaux
	sexe poids initial	-	élevage d'embouche

6.5. Objectifs de développement et environnement économique

Objectifs

Dans le projet PSS les objectifs de développement inclus dans les analyses avec le modèle PLBM sont la durabilité (bilans de la matière organique, et des éléments nutritifs), la sécurité alimentaire (en année normale et en année sèche), le revenu net, les productions des céréales, du coton, du lait et de la viande, la sécurité fourragère pour le bétail (en année normale et en année sèche). Ce sont alors les attributs considérés. Les productions et le revenu net sont des objectifs. Les autres attributs ont tous été donné des valeurs cibles, et sont donc inclus dans le modèle comme buts. Des niveaux cibles pour la sécurité alimentaire sont donnés dans la suite (tableau 6.17). Concernant la durabilité, le but est que les différents bilans soient tout à fait en équilibre.

Les prix : relation entre la production et le prix

Les prix des intrants externes (engrais et suppléments) et des produits finaux sont des coefficients importants dans le modèle. Les prix considérés pour les intrants et extrants au niveau du cercle de Koutiala sont donnés dans le tableau 6.17. Il est possible d'analyser l'effet des niveaux de prix choisis avec des analyses de sensibilité (voir la section 6.8).

Un problème de l'utilisation des prix fixes est qu'implicitement on suppose que le prix d'un produit ne dépend pas de la quantité produite, ce qui est souvent réaliste pour un paysan, mais ce n'est pas réaliste pour une zone. Un effort a été fait pour soulever ce problème. La meilleure solution serait d'inclure dans le modèle de façon intégrée l'ensemble des relations entre les prix et les productions des produits agricoles. Comme cela est très difficile, sinon impossible, on s'est restreint aux relations prix-quantité de quelques produits individuels. A défaut d'élasticités prix de la demande la démarche suivante a été suivie.

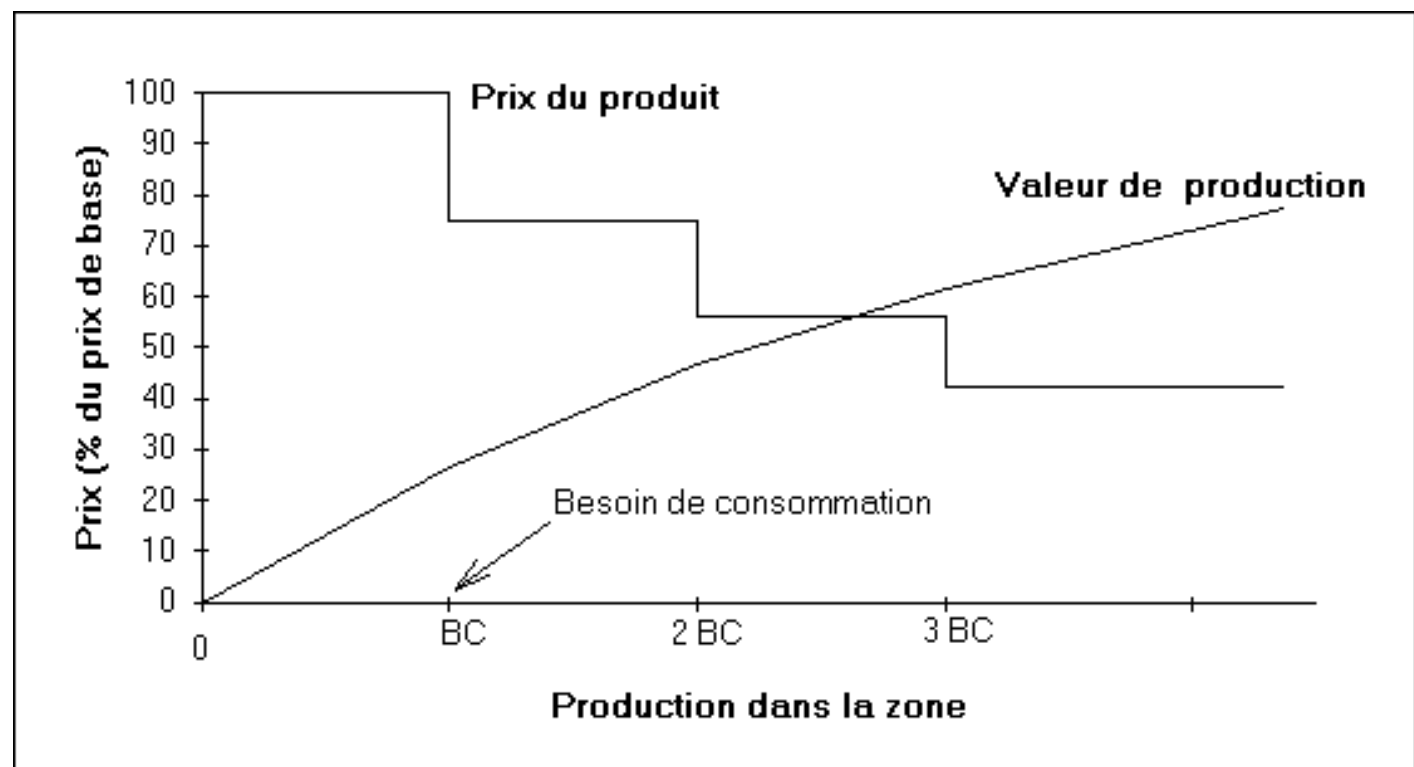


Figure 6.8. Le niveau de prix pour les différents tranches de la production totale d'un produit vivrier.

Le point de départ est le tableau 6.17 où les prix de base des intrants et des produits agricoles sont donnés et, pour les produits pour lesquels le prix dépend de sa production, la demande pour la consommation. La production totale d'un produit a été divisée en 4 tranches. La première tranche est celle entre zéro et le besoin total dans la zone pour la consommation. Dans cette tranche la production est valorisée à 100 % du prix de base. La deuxième tranche succède la première tranche et est aussi longue que celle-ci. La troisième tranche suit la deuxième et a aussi la même longueur. La quatrième et dernière tranche succède la troisième et continue à l'infini. Le prix du produit dans la deuxième tranche est 75 % du prix de base, celui dans la troisième tranche est 75 % du prix de la deuxième tranche, le prix dans la quatrième tranche est de nouveau 75 % du prix de la troisième tranche. Il est à signaler que si la production dépasse le maximum de la tranche 1, le prix pour la production de cette tranche reste toujours le prix de base. Dans ce cas il n'y a plus un seul prix pour toute la production. Ainsi la valeur de production est une fonction continue de la production. La démarche est présentée dans la figure 6.8.

Tableau 6.17 Niveaux de prix considérés pour les intrants et extrants et les normes de consommation (en unité par personne) et la demande « normale » utilisé pour la fonction de prix.

	prix (F cfa)	unité	source (prix)	norme de consomm.	demande normale
extrants					
mil	47	kg	1	90	125
sorgho	36	kg	1	55	125
maïs	35	kg	1	67	125
niébé graines	75	kg		10	15
arachide graines	75	kg		12	15
riz	100	kg	1		125
coton graines (1er choix)	125	kg	2		
lait	150	kg		9	40
viande bovine	325	kg poids vif	3	12	18
bois de chauffe	1500	m ³		0,75	
bois de service	3000	m ³		0,1	
intrants					
azote (N)	360	kg élément pur	4		
phosphore (P)	650	kg élément pur	4		
potassium (K)	360	kg élément pur	4		
tourteau de coton	50	kg			
main-d'oeuvre r&e acute;munérée	600	homme-jour			

Sources:

1 : OPAM/SIM (1995)

2 : Contrat-Plan CMDT-SYCOV

3 : Statistiques OMBEVI

4 : IFDC (1994)

6.6. Le modèle PLBM pour une seule zone climatique

Dans la suite [le modèle de PLBM](#) utilisable pour une zone climatique est présentée avec y inclus des exercices. L'exemple porte sur la zone de Koutiala.

6.7. Développement d'une étude de cas

Comme partie intégrante de ce cours d'analyse de l'utilisation de la ressource terre, une étude de cas est faite. Elle est faite en utilisant les outils développés par le projet PSS, notamment, le Générateur de Coefficients

Techniques (GCT), et le modèle de PL, donné dans le chapitre 6.6.

Les étapes suivantes seront suivies :

1. Choisir une zone du Mali
2. Définir les stratégies et les fonctions objectifs à inclure dans l'étude de cas
3. Déterminer les coefficients des intrants/extrants en utilisant le GCT.
4. Déterminer et quantifier les contraintes.
5. Développer le IMGPL dans XPRESS
6. Générer un certain nombre de scénarios d'utilisation de la ressource terre.
7. Faire une analyse de sensibilité avec le modèle développé
8. Les résultats seront présentés dans un rapport qui sera présenté et discuté en plénière.

References

Alfaro, R., J. Bouma, L.O. Fresco, D.M. Jansen, S.B. Kroonenberg, A.C.J. van Leeuwen, R.A. Schipper, R.J. Sevenhuysen, J.J. Stoorvogel & V. Watson, 1994. Sustainable land use planning in Costa Rica: a methodological case study on farm and regional level. In: L.O. Fresco, L. Stroosnijder, J. Bouma & H. van Keulen (eds.). The future of the land: mobilizing and integrating knowledge for land use options. John Wiley & Sons Ltd, Chicester, p. .

Ayyad, M.A. & H. van Keulen (Eds), 1987. The 'Mariut' project. Final report submitted to Directorate General for International Cooperation (DGIS), Part 1 (191 pp.), Part 2 (204 pp.), Part 3. CABO, Wageningen, the Netherlands.

Bakker, E.J., H. Hengsdijk & J.J.M.H. Ketelaars, 1996, [Description quantitative des systèmes de production animale en zone soudano-sahélienne](#). Rapport PSS 27.

Beek, P. van & Th.H.B. Hendriks, 199x. PHLO-cursus 'Mathematische programmering'. Speciale onderwerpen. Vakgroep Wiskunde, LUW.

Bessembinder, J. (submitted). Uncertainties in input-output coefficients for land use studies: an illustration with fertilizer use efficiency. Neth. J. Agr. Science.

Beyers & Partners N.V., 1993. OMP Manual, 360 pp.

- Breman, H., 1990, Integrating crops and livestock in southern Mali: Rural development or environmental degradation? Dans: *Theoretical Production Ecology: Reflections and prospects* (Rabbinge et al., eds.) Simulation monographs 34, Pudoc, Wageningen.
- Breman, H. & N. de Ridder, 1991, [Manuel sur les pâturages des pays sahéliens](#). Editions Karthala, ACCT, CABO-DLO, et CTA, Paris, Wageningen 405 p.
- Cissé & Gossye, 1990. Compétition pour les ressources limitées : le cas de la cinquième région du Mali. Rapport 1. Ressources naturelles et population. CABO/ESPR, CABO, Wageningen, the Netherlands, 180 pp.
- De Koning, G.H.J., C.A. van Diepen, 1992. Crop production potential of rural areas within the European Communities. IV: Potential, water-limited and actual crop production. Working document (W68), Netherlands Scientific Council for Government Policy, The Hague, 83 pp.
- De Ridder, N. & H. van Keulen, (in press). Estimating biomass through transfer functions based on simulation model results: a case study for the Sahel. *Agr. Water Management*.
- De Wit, C.T. & H. van Keulen, 1987. Modelling production of field crops and its requirements. *Geoderma* 40. p 253-265.
- De Wit, C.T., 1992. Resource use efficiency in agriculture. *Agricultural Systems* 40, p 125-151.
- De Wit, C.T., H. van Keulen, N.G. Seligman & I. Spharim, 1988. Application of interactive multiple goal programming techniques for analysis and planning of regional agricultural development. *Agricultural Systems* 26: 211-230.
- Driessen, P.M. & N.T. Konijn, 1992. Land-use systems analysis. CIP-data Koninklijke bibliotheek, Den Haag.
- Driessen, P.M., 1986. Nutrient demand and fertilizer requirements. In *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*, eds H. van Keulen & J. Wolf. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, the Netherlands, p 182-200.
- Duivenbooden, N. van, 1992, Sustainability in terms of nutrient elements, with special references to West-Africa. CABO-DLO report 160. Wageningen, The Netherlands, 261 p.
- Duivenbooden, N. van, P.A. Gosseye & H. van Keulen (eds), 1991, *Compétition pour les ressources limitées : le cas de la cinquième région du Mali. Rapport 2. Productions végétales, animales et halieutiques*. CABO. Wageningen, Pays-Bas, ESPR, Mopti, Mali. 266p.
- Eurostat, 1989. *Agricultural statistical yearbook. Theme 5: Agriculture, forestry and fisheries*. Luxembourg, 262 pp.
- Eurostat, 1990. *Agricultural statistical yearbook. Theme 5: Agriculture, forestry and fisheries*. Luxembourg, 262 pp.

Eurostat, 1991. Sociaal portret van Europa. Luxembourg, 142 pp.

Eurostat, 1992. Europa in cijfers. Derde uitgave. Luxembourg, 256 pp.

FAO, 1992. FAO year-book, Vol.45. Production 1991. FAO statistics Series N. 104.

Heemst, H.D.J. van, J.J. Merkelijn & H. van Keulen, 1981, Labour requirements in various agricultural systems dans :Quart J. Int. Agr. vol 20, n°2, april-June. p.178-201

Hendriks, Th.H.B. & P. van Beek, 1991. Optimaliseringstechnieken. Principes en toepassingen. Derde geheel herziene druk, Bohn Stafleu Van Loghum, Houten, 348 pp.

Keulen van H., & H. Breman, 1990, Agricultural development in the Western African Sahelian region: a cure against land hunger? Agriculture, Ecosystems and Environment (32): 177-197.

Keulen, H. van & F.R. Veeneklaas, 1993. Options for agricultural development: a case study for Mali's fifth Region. In: Systems Approaches for Agricultural Development, Penning de Vries et al. (eds), Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, p. 367-380.

Keulen, H., van & H.H. van Laar, 1986. The relation between water use and crop production. In Modelling of agricultural production: weather, soils and crops, eds H. van Keulen & J. Wolf. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, the Netherlands, p 117-129.

Keulen, H., van 1986. Crop yield and nutrient requirements. In Modelling of agricultural production: weather, soils and crops, eds H. van Keulen & J. Wolf. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, the Netherlands, p 155-181.

Koning, G.H.J. de & C.A. van Diepen. Crop production potential of rural areas within the European Communities. IV: Potential, water-limited and actual crop production. Working document (W68), Netherlands Scientific Council for Government Policy, The Hague, 83 pp.

Latesteijn, H.C. van & R. Rabbinge, 1992. Scenario's als hulpmiddel voor beleidmakers: Grond voor keuze - een toelichting. Spil, nr 5, p 12-16.

Latesteijn, H.C. van & R. Rabbinge, 1993. Grond voor keuzen ook grond voor discussie. Spil 111-112. p 33-38.

Latesteijn, H.C. van, 1993. A methodological framework to explore long-term options for land use. In: F.W.T. Penning de Vries et al. (eds), Systems approaches for Agricultural Development. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, p 445-455.

Nijkamp, P. & J. Spronk, 1980. Interactive multiple goal programming: an evaluation and some results. In: G. Fandel & T. Gal (eds): Multiple criteria decision making theory and application. Springer Verlag, Berlin, pp. 278-293.

Penning de Vries, F.W.T. & M.A. Djitèye (eds), 1982, [La production des pâturages sahétiens. Une étude des sols des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle](#). Agric Reseach Reports 918. Pudoc Wageningen 525 p.

PIRT, 1983 a, Les ressources terrestres au Mali. Volume I. Atlas. Projet Inventaire Ressources Terrestres au Mali. Mali/USAID, Bamako, Mali, TAMS, New York, USA, 33 cartes au 1/500.000 + 33 transparents

PIRT, 1983 b, Les ressources terrestres au Mali. Volume II. Rapport technique. Projet Inventaire Ressources Terrestres au Mali. Mali/USAID, Bamako, Mali, TAMS, New York, USA. 406 p.

PIRT, 1983 c, Les ressources terrestres au Mali. Volume III. Annexes. Projet Inventaire Ressources Terrestres au Mali. Mali/USAID, Bamako, Mali, TAMS, New York, USA. 532 p.

Purseglove, J.W., 1974, Tropical crops. Dicotyledons. Longman, London 719 p.

Purseglove, J.W., 1975, Tropical crops. Monocotyledons. Longman, London 607 p.

Quak, W., H. Hengsdijk & E.J. Bakker (1996) Coefficients agronomiques quantitatives des systèmes de production culture durables en zone soudano-sahélienne. Rapports PSS

Rabbinge, R. & H.C. van Latesteijn, 1992. Long-term options for land use in the European Community. Agricultural Systems 40. p 195-210.

Rabbinge, R. & H.C. van Latesteijn, 1992. Long-term options for land use in the European Community. Agricultural Systems 40: 195-210.

Rabbinge, R. & M.K. van Ittersum, 1994. Tension between aggregation levels. In: L.O. Fresco et al., 1994. The future of the land: Mobilising and integrating knowledge for land use options. John Wiley & Sons Ltd. p 31-40.

Rabbinge, R., 1991. Perspectives for rural areas in the European Community. Netherlands Scientific Council for Government Policy. Presentation to the council of Ministers on October 1, 1991.

Rabbinge, R., 1993. The ecological background of food production. In Crop protection and sustainable agriculture. Wiley, Chichester (Ciba Foundation Symposium 177), p 2-29.

Rabbinge, R., W.A.H. Rossing & W van der Werf, 1994. Systems approaches in pest management: the role of production ecology. In: Rajan, A. & Y Ibrahim, 1994 (eds). Plant protection in the tropics. Proc. Int. Conf. on Plant Protection in the tropics, Malaysian Plant Protection Society. p 25-46.

Rheenen, T.van, 1995. Farm household optimal resource allocation; an explorative study in the limestone area of East Java. PhD thesis, Department of Theoretical Production Ecology and Department of Development Economics. Wageningne Agricultural University, The Netherlands.

Romero, C. & T. Rehman, 1989. Multiple criteria analysis for agricultural decisions. Developments in

Agricultural Economics, 5, Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 257 pp.

Roose, E., 1977, Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Travaux et documents de L'O.R.S.T.O.M., Paris, 108 pp.

Rossing et al., 1994

Rossing, W.A.H., 1989. Application of operations research techniques in crop protection. In: R. Rabbinge et al. (Eds), Simulation and systems management in crop protection. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 278-298.

Schans, J., 1991. Optimal potato production systems with respect to economic and ecological goals. Agricultural Systems 37: 387-397.

Sissoko, K., 1996, Les ressources naturelles, la population et les conditions économiques en zone soudano-sahélienne du Mali, Rapport PSS

Spharim, I., R. Spharim & C.T. de Wit, 1992. Modelling agricultural development strategy. In: Th. Alberda et al. (Eds), Food from dry lands. An integrated approach to planning of agricultural development. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 159-192.

Spronk, J. & F.R. Veeneklaas, 1983. A feasibility study of economic and environmental scenarios by means of interactive multiple goal programming. Regional Science and Urban Economics 13: 141-160.

Stroosnijder, L. & T. van Rheenen, 1993. Making farming systems a more objective and quantitative research tool. In: Systems Approaches for Agricultural Development, Penning de Vries et al. (eds), Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, p. 341-353.

Tanner, C.B. & T.R. Sinclair, 1983, Efficient water use in crop production. Research or Re-research ? Dans: Taylor et al. (eds). (1983). p 1-27.

techniques for analysis and planning of regional agricultural development. Agricultural Systems 26: 211-230.

Veeneklaas, 1991. [Competing for limited resources: The case of the Fifth region of Mali. Report 3. Formal description of the optimization model MALI5](#). CABO/ESPR, CABO, Wageningen, the Netherlands, 62 pp.

Veeneklaas, F.R., 1990. Dovetailing technical and economic analysis. PhD. thesis, Erasmus University Rotterdam, the Netherlands, 159 pp.

Veeneklaas, F.R., S. Cissé, P.A. Gosseye, N. van Duivenbooden & H. van Keulen, 1991. [Competing for limited resources: The case of the Fifth region of Mali. Report 4. Development scenario's](#). CABO/ESPR, CABO, Wageningen, the Netherlands, 144 pp.

Ven, G.W.J. van de, 1994. A mathematical approach for comparison of environmental and economic goals in dairy farming at regional scale. In: L 't Mannelje & J. Frame (eds): Grassland and Society. Proceedings of the 15th General Meeting of the European Grassland Federation, June 6-9, 1994, p. 453-457.

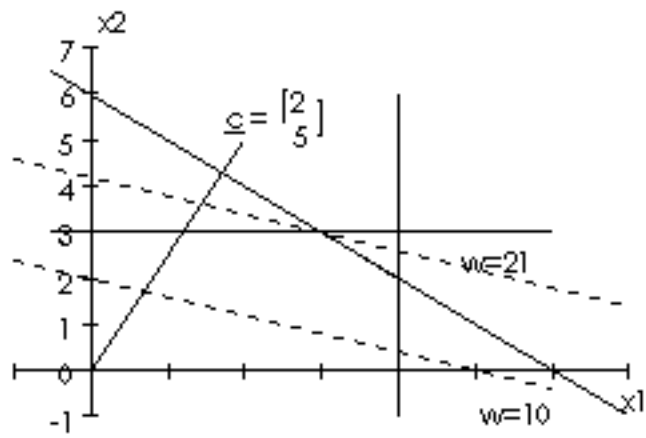
Verberne E.L.J, J. Hassink, P de Willigen, J.J.R. Groot & J.A. van Veen, 1990, Modelling organic matter dynamics in different soils. Neth. J. Agr. Science 38, p. 221-238.

Wischmeier, W.H. & D.D. Smith, 1960, A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. 7 th Int. Congress Soil Sc., Vol I, pp. 418-425.

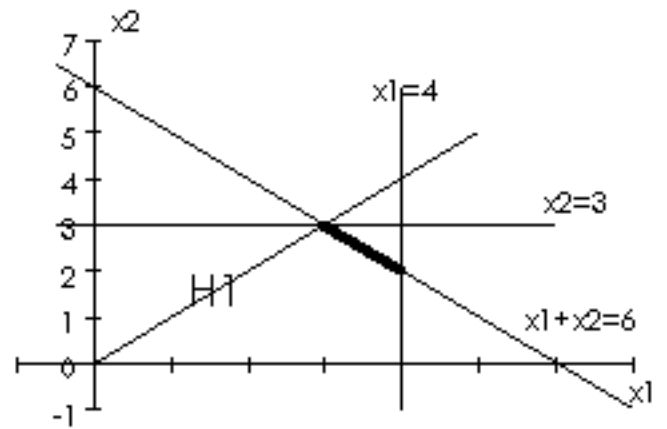
WRR [Netherlands Scientific Council for Government Policy], 1987. Ruimte voor groei. Rapporten aan de Regering, nr. 29, The Hague, The Netherlands, 254 pp.

WRR [Netherlands Scientific Council for Government Policy], 1992. De le'espace pour choisir. Quatre perspectives pour les zones rurales dans la Communauté Européene. Rapport au Gouvernement nr. 42, The Hague, The Netherlands, 149 pp.

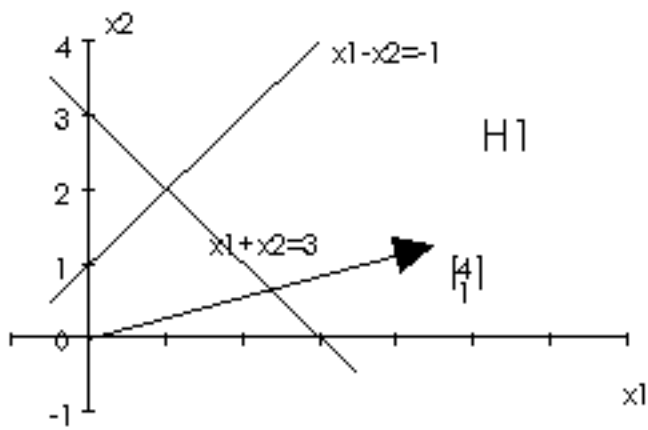
WRR [Netherlands Scientific Council for Government Policy], 1994. Duurzame risico's: een blijvend gegeven. Rapporten aan de Regering, nr. 44, The Hague, the Netherlands, 208 pp.



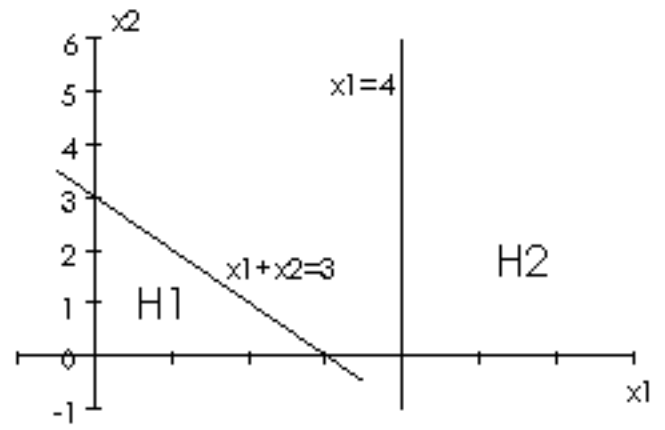
a. solution unique



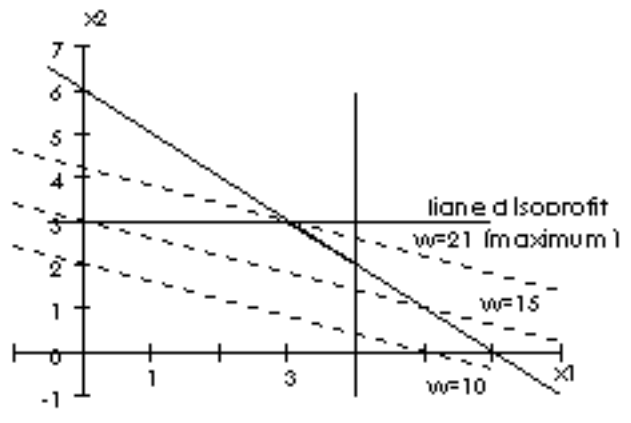
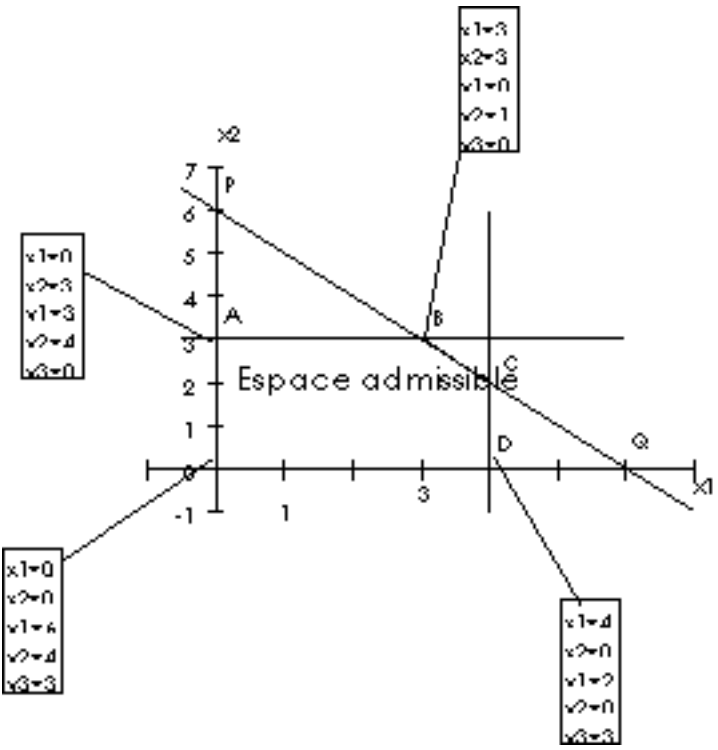
b. solutions alternatives

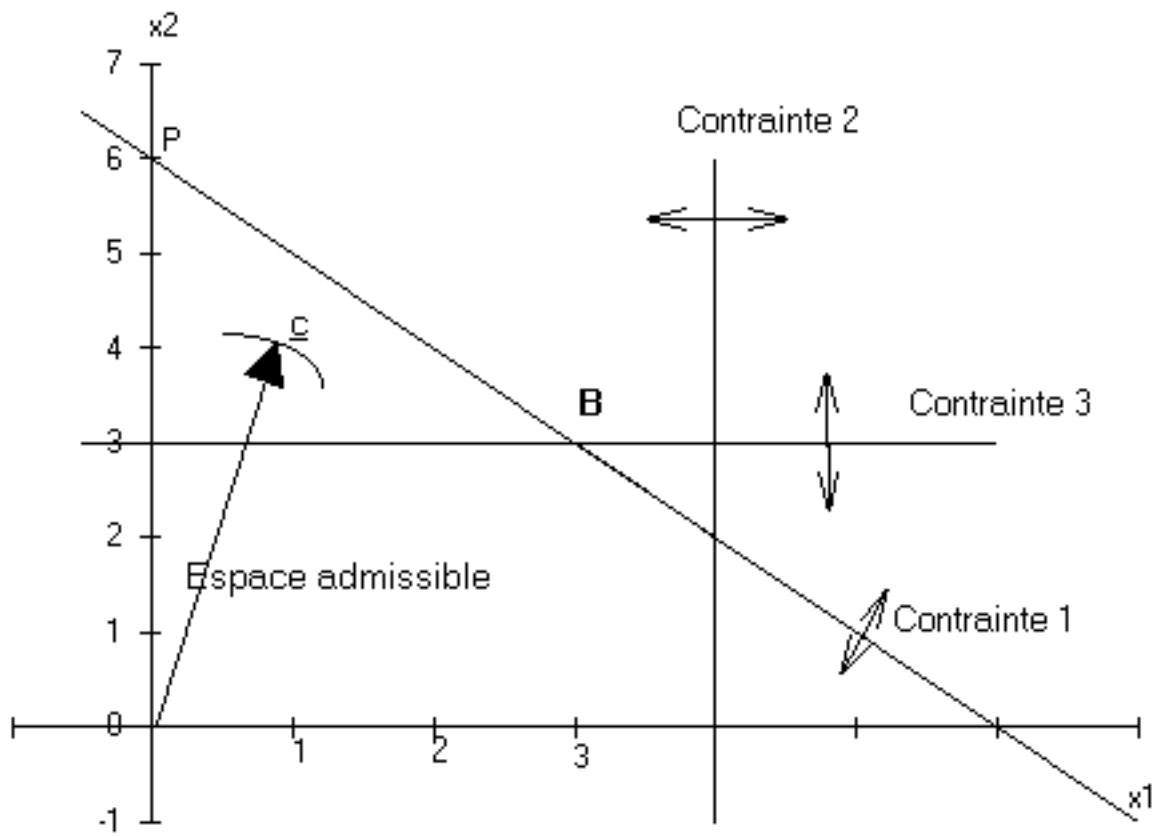


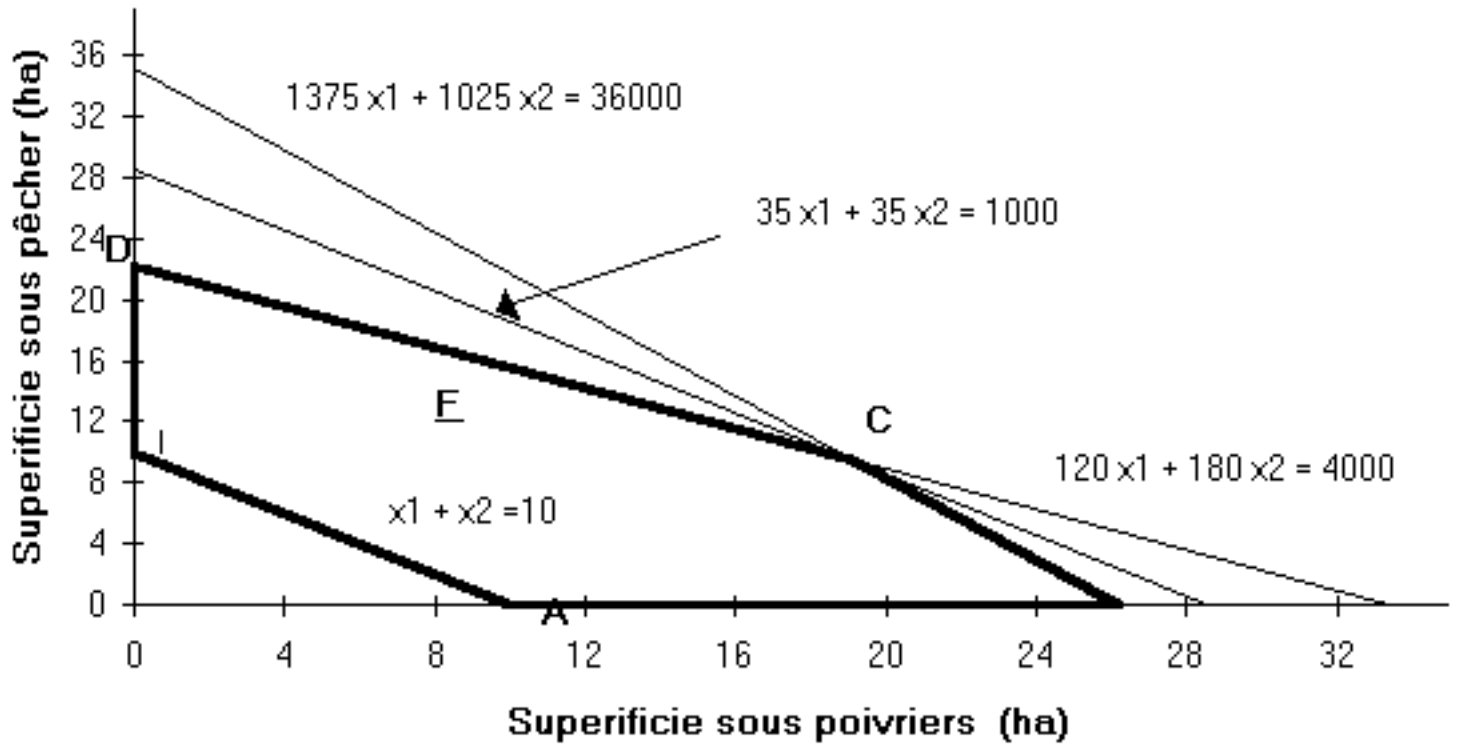
c. solution indéterminée

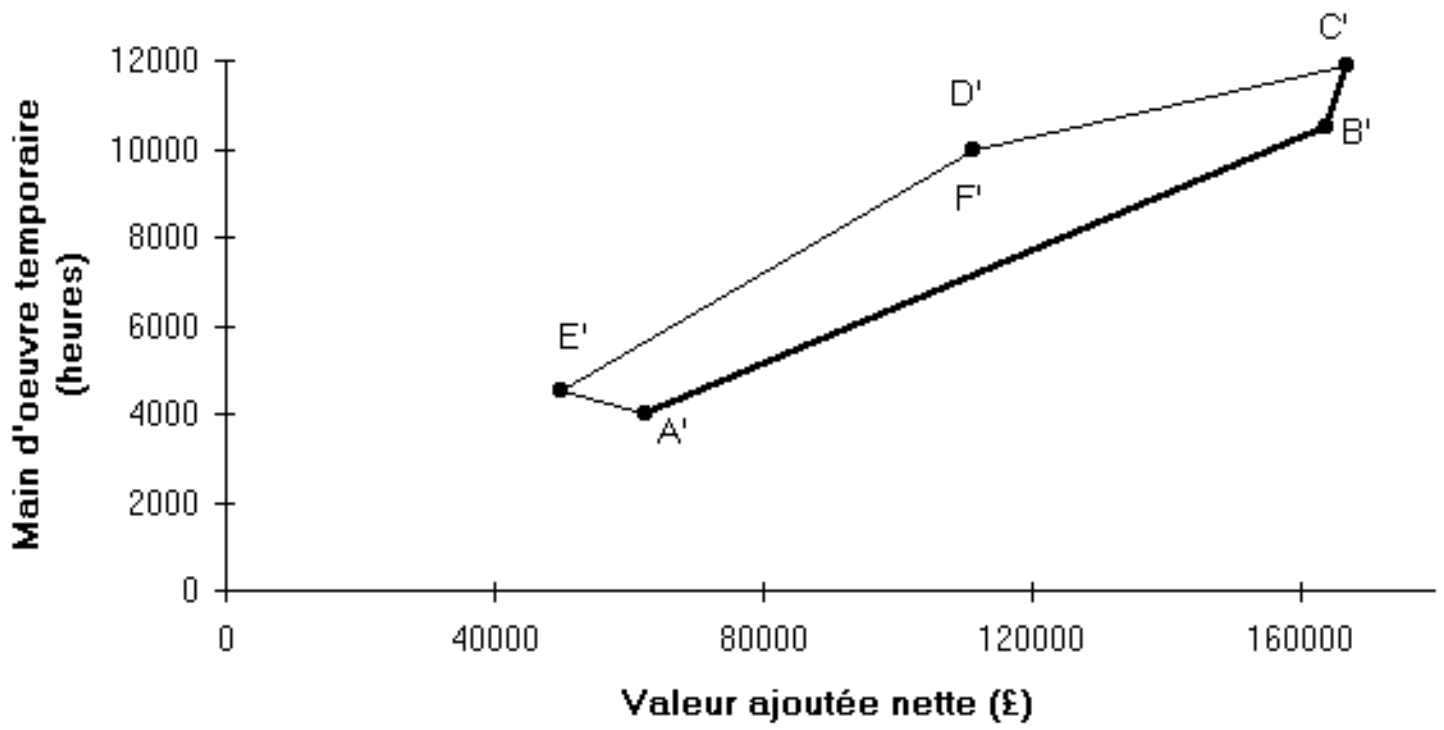


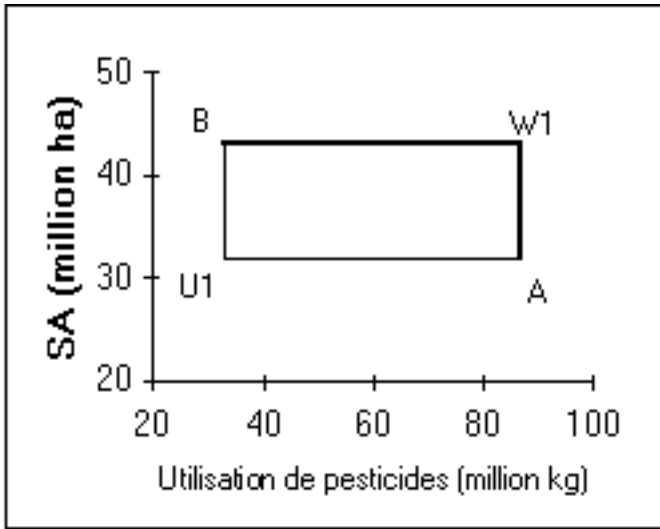
d. solution impossible



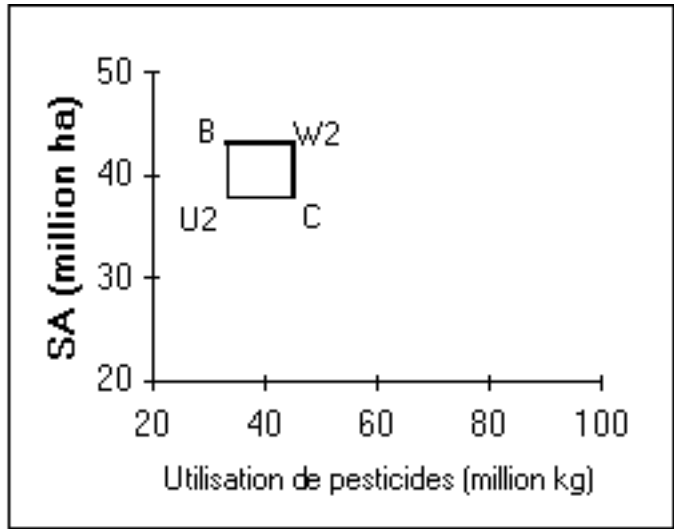




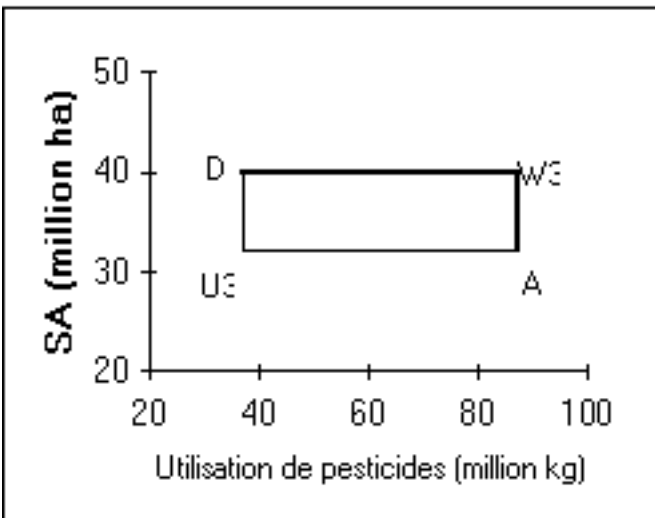




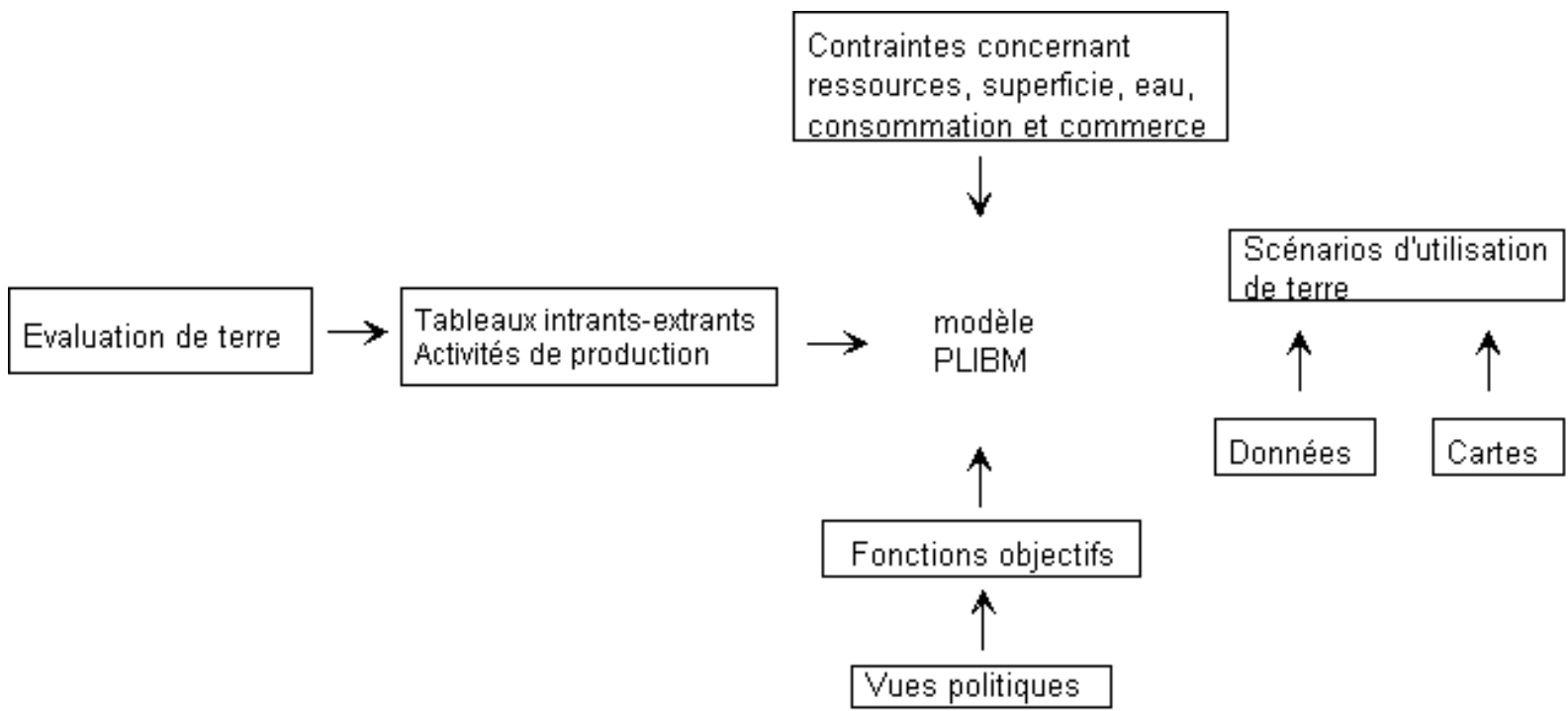
a

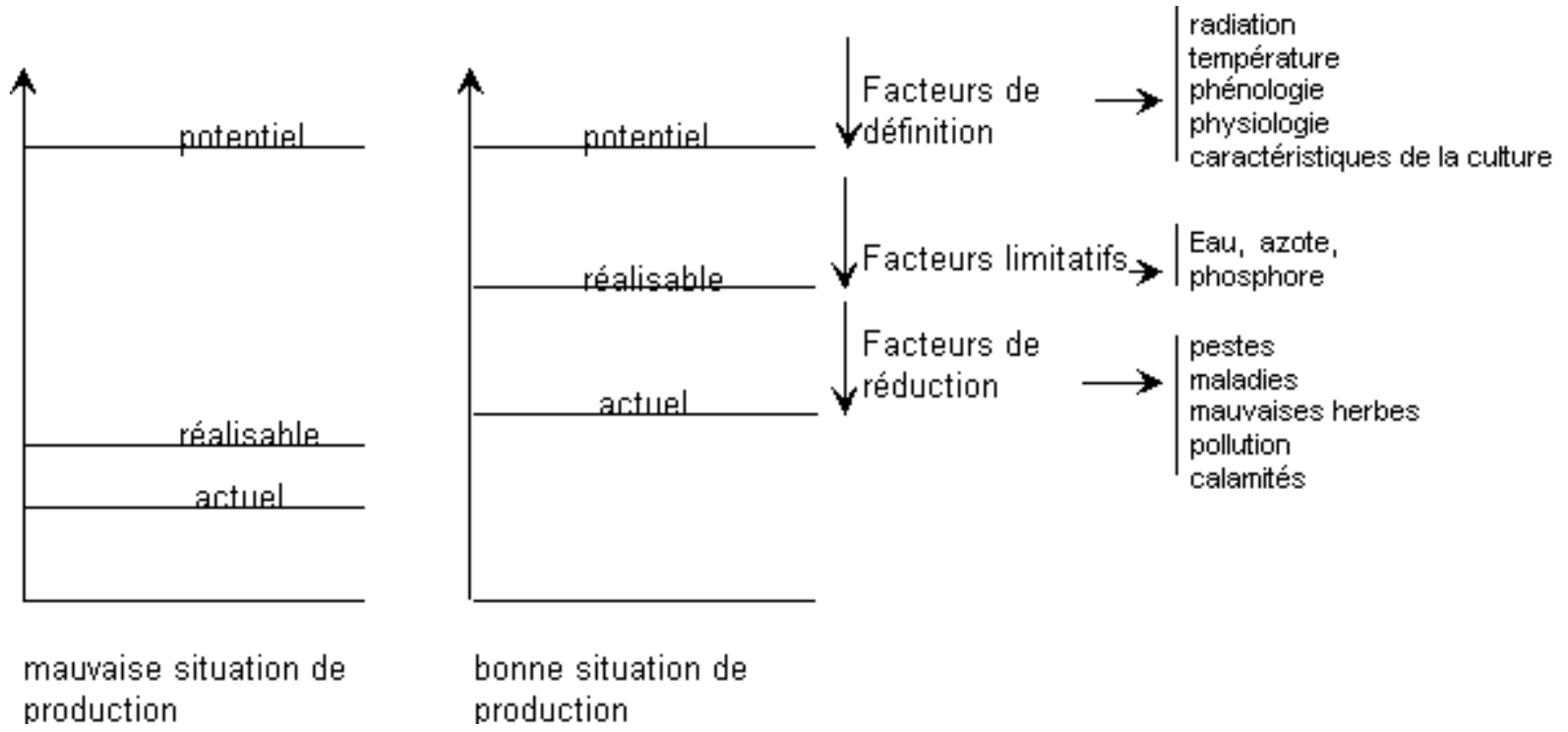


b

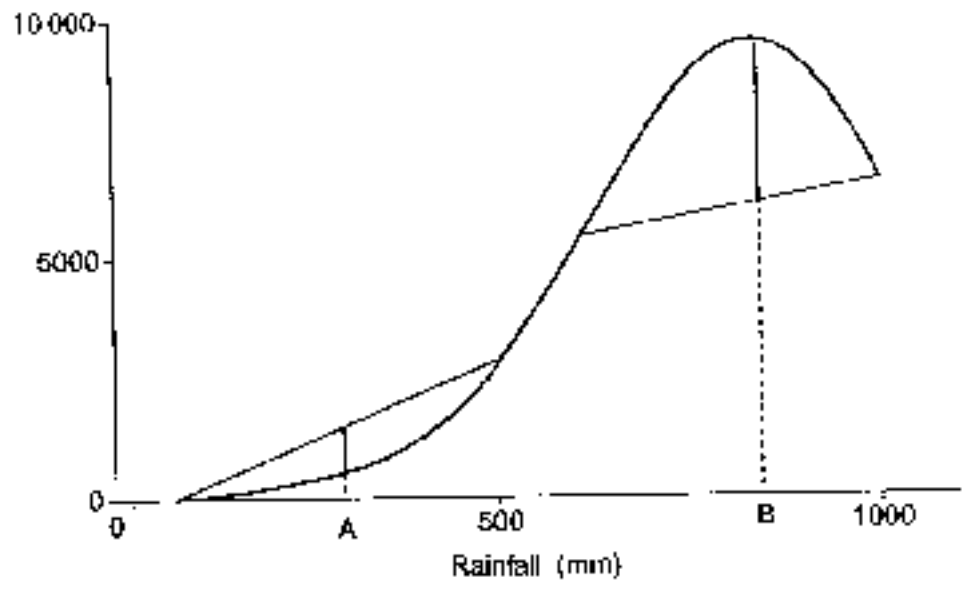


c





Yield (kg / ha)



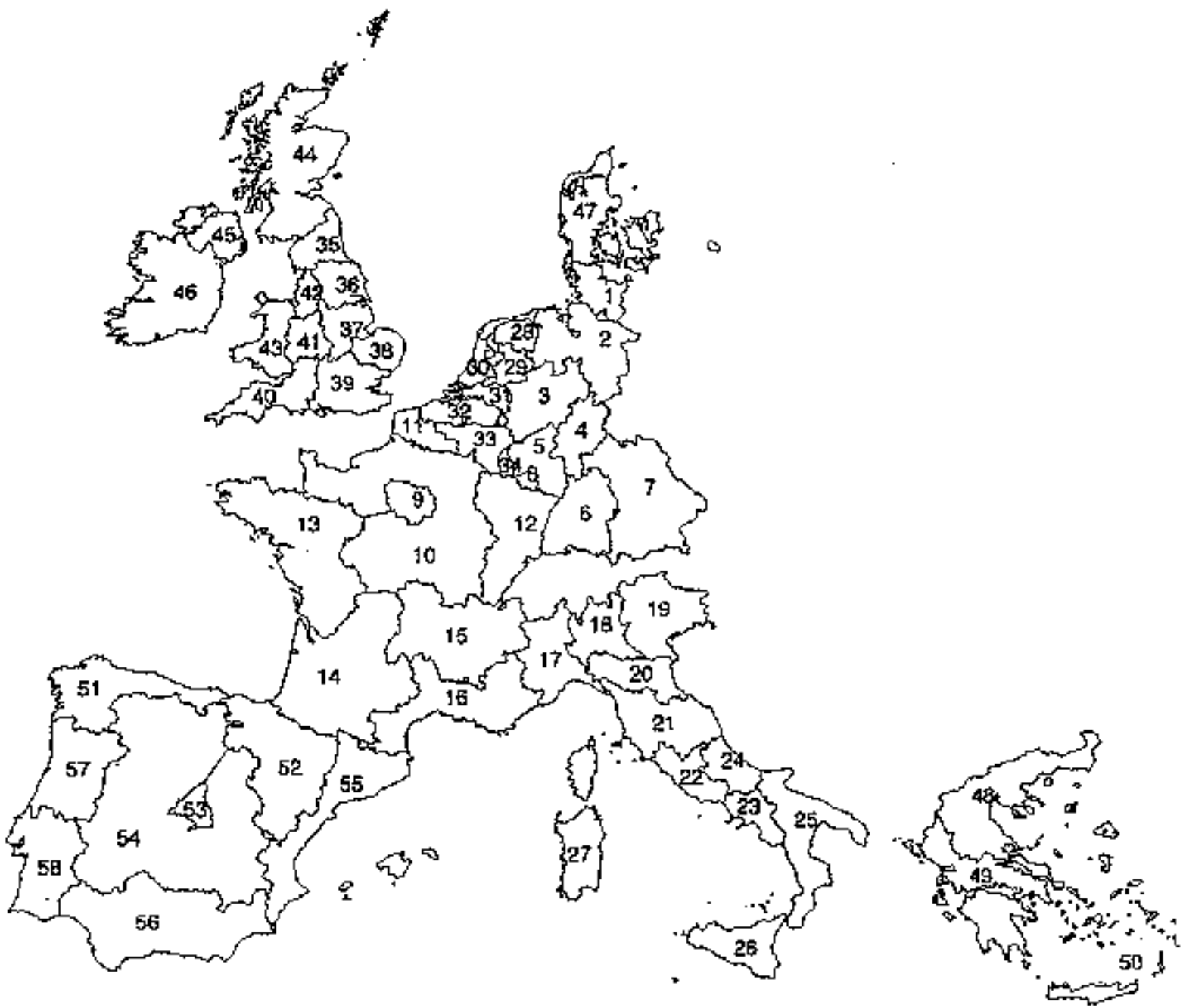
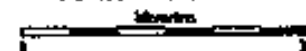


Figure 5.1 Unités politico-administratives au niveau NUTS-1 dans la CE.

MAP OVERLAY PROCEDURE PART OF THE EC

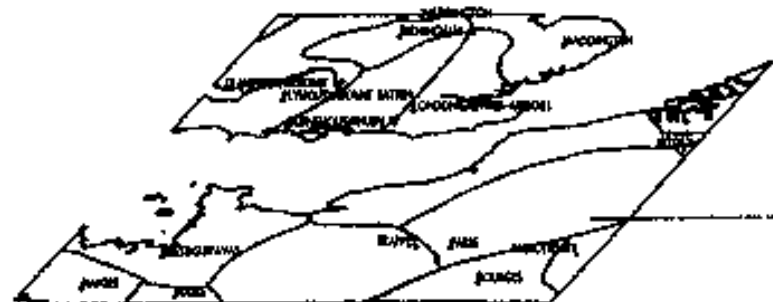
SCALE 1 : 5000000



MAP 1



ADMINISTRATIVE MAP (NUTS-1)



AGRO-CLIMATIC MAP



SOIL MAP



LAND EVALUATION MAP

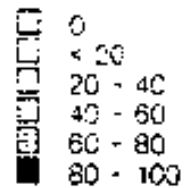
LEGEND

- | | | | |
|--|-----------------|--|--------------------------|
| | ARENOSOLS | | PODZOLUVISOLS |
| | CAMBISOLS | | RANKERS |
| | ANDOSOLS | | PHAEOZEMS |
| | FLUVISOLS | | PLANDSOLS |
| | GLEYOLS | | REGOSOLS |
| | HISTOSOLS | | RENDZINAS |
| | LITHOSOLS | | SOLOCHAKS |
| | LUVISOLS | | VERTISOLS |
| | PODZOLS | | XEROSOLS |
| | nuts boundaries | | agro-climatic boundaries |
| | coast line | | |



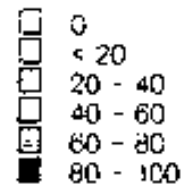
<p>STATEN INSTITUTE VOOR LAND- EN VISBOUW WAGeningen THE NETHERLANDS</p>	<p>ONLY PRODUCTION POTENTIAL OF BARE AREAS WITHIN THE EUROPEAN COMMUNITY</p> <p>project n. 1000 map number n. 1000-0 based on data provided except errors by users all rights reserved date: January 98</p>
--	---

[% of UAA]



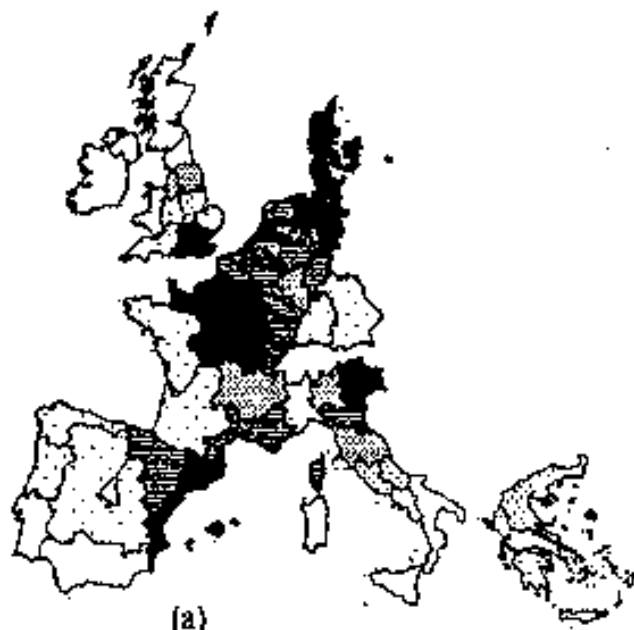
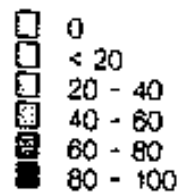
(a)

[% of UAA]



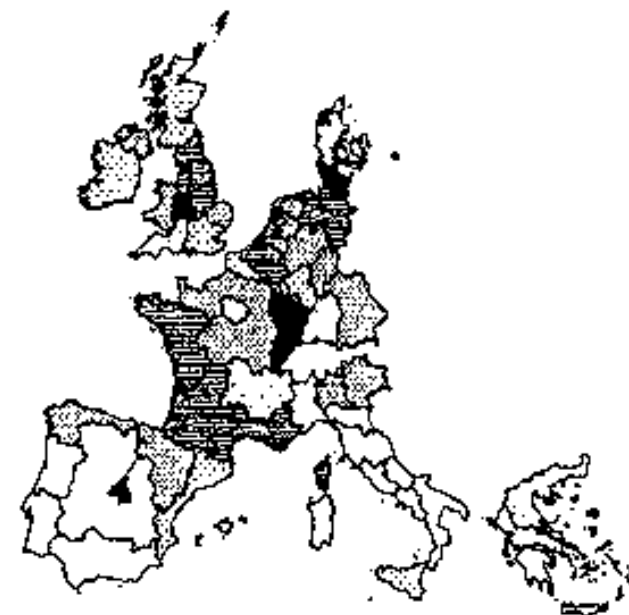
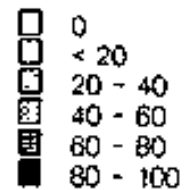
(b)

[% of UAA]



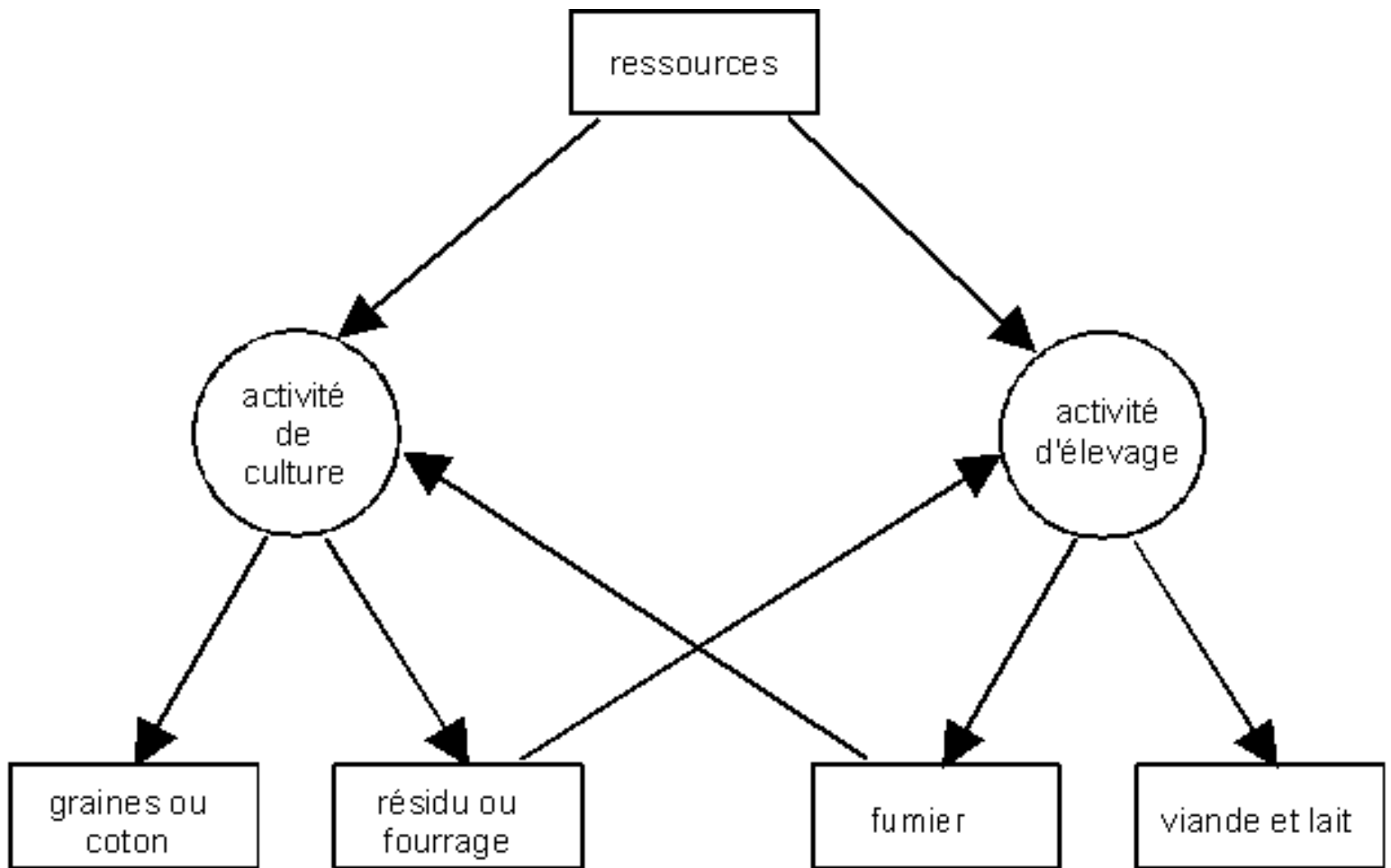
(a)



[% of UAA]



(b)

Figure 5.5 Allocation de la production des céréales (a) et des plantes herbacées (b) pour les scénarios A (en haut) et B (en bas). Les hachures indiquent le pourcentage de la superficie appropriée (UAA) par région qui est actuellement utilisé.



Légende :  intrant et/ou extrant d'une activité
 activité : processus plus ou moins complexe de transformation des intrants et extrants

