

Rapports PSS N°28 (Chapitre 1, 2, 3 et 4)

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

Projet de coopération scientifique

Description agronomique quantitative des systèmes de production végétale en zone soudano-sahélienne

W. Quak¹⁾, H. Hengsdijk¹⁾, E.J. Bakker¹⁾, K. Sissoko²⁾ & M.S.M. Touré²⁾

sous la direction de

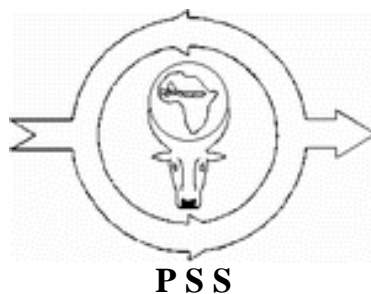
H. Breman, chef du programme PSS, AB-DLO ¹⁾

Adresse :

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

²⁾ Institut d'Economie Rurale (IER), B.P. 258, Bamako, Mali

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



Rapports PSS N° 28

Wageningen, 1996

Rapports du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS)

Numéro 28

Table des matières

- [Préface](#)
- [1. Introduction](#)
 - [1.1. Les objectifs du rapport](#)
 - [1.2. Structure du rapport](#)
- [2. Définition des activités](#)

- [2.1. Introduction](#)
- [2.2. Approche de définition des activités culturelles](#)
 - [Les sous-zones](#)
 - [La pluviosité](#)
 - [Le sol](#)
 - [Les cultures](#)
 - [Les niveaux de production](#)
 - [L'utilisation des résidus](#)
 - [Les mesures de conservation de l'eau et du sol](#)
- [3. Ressources](#)
 - [3.1. Les sols](#)
 - [3.1.1. Caractéristiques principales du sol : texture, profondeur, présence de gravillons et aptitude à être inondé](#)
 - [Texture](#)
 - [Profondeur](#)
 - [Gravillons](#)
 - [Inondation](#)
 - [3.1.2. Caractéristiques dérivées ou secondaires](#)
 - [Capacité de rétention d'eau](#)
 - [Capacité d'infiltration](#)
 - [Perméabilité et structure](#)
 - [Pente](#)
 - [Taux de matière organique](#)
 - [3.1.3. Aptitude des substrats pour les cultures](#)
 - [3.2. Le climat](#)
- [4. Rendement des cultures](#)
 - [4.1. L'eau disponible pour la plante](#)
 - [4.1.1. Le ruissellement](#)
 - [4.1.1.1. L'intensité et la durée des pluies](#)
 - [4.1.1.2. L'infiltration maximale par événement pluvieux](#)
 - [4.1.1.3. La capacité de stockage](#)
 - [4.1.1.4. Quantité de pluie ruisselée](#)
 - [4.1.1.5. Ruissellement annuel](#)
 - [4.1.2. Début et fin de la saison de croissance](#)
 - [4.1.3. L'eau disponible pour la croissance](#)
 - [4.1.4. La production de biomasse cible](#)
 - [4.2. La biomasse cible aux quatre niveaux de production](#)
 - [Biomasse cible de la production intensive](#)
 - [Biomasse cible de la production semi-intensive](#)
 - [Biomasse cible de la production semi-extensive](#)
 - [Biomasse cible de la production extensive](#)
 - [4.3. Production de biomasse cible par rapport aux rendements cibles](#)

- [5. Les intrants des cultures](#)
 - [5.1. La matière organique](#)
 - [5.2. Nutriments](#)
 - [5.2.1. Processus de pertes](#)
 - [Export de nutriments par les extrants de l'activité](#)
 - [Volatilisation et dénitrification](#)
 - [Lessivage](#)
 - [Fixation du K](#)
 - [L'érosion](#)
 - [Effet du niveau de production et de la source de nutriments](#)
 - [5.2.2. Processus d'apport](#)
 - [Dépôts humides et secs](#)
 - [Fixation de l'azote par des micro-organismes \(libres et associés\)](#)
 - [Altération des minéraux](#)
 - [Fixation de l'azote par des micro-organismes vivant en symbiose avec des légumineuses](#)
 - [Fumier, résidus de récolte et engrais](#)
 - [5.2.3. Phosphate](#)
 - [5.3. Main d'oeuvre](#)
 - [5.4. Boeufs de labour](#)
 - [5.5. Capital et intrants consommables](#)
- [6. Les extrants des cultures](#)
 - [6.1. Résidus de récolte](#)
 - [6.2. Nutriments à la ferme et capacité d'immobiliser l'azote](#)
 - [6.3. Erosion](#)
 - [Facteur de pluviosité \(R\)](#)
 - [Facteur d'érodibilité \(K\)](#)
 - [Facteur de paysage \(L\)](#)
 - [Facteur de couverture de la culture \(C\)](#)
 - [Facteur de gestion du sol \(P\)](#)
 - [6.3.1. Exploitation de l'USLE](#)
- [7. Activités de transformation](#)
 - [7.1. Jachère](#)
 - [7.2. Pâturage](#)
 - [7.3. Brûlis des résidus](#)
 - [7.4. Enfouissement des résidus](#)
 - [7.5. Paillage](#)
 - [7.6. Fabrication de litière](#)
 - [7.7. Transport des résidus à la ferme](#)
 - [7.8. Transport de matière organique au champ](#)
- [Bibliographie](#)
- [Annexes](#)

- [Annexe I Carte de la région soudano-sahélienne et distribution des types de sol](#)
- [Annexe II Transformation sol-FAO/UNESCO en sol-PIRT](#)
- [Annexe III Stations pluviométriques](#)
- [Annexe IV Coefficients culturaux](#)

« La recherche présentée dans cette publication a été financée par le Ministère néerlandais de la coopération au développement. Toute référence à ce travail est encouragée. De courts extraits peuvent être traduits et/ou reproduits sans permission préalable des auteurs, à condition que leur source soit indiquée. Pour ce qui est de la traduction ou de la reproduction totale, la section DST/SO du Ministère ci-dessus mentionnée doit être notifiée à l'avance (Boîte postale 20061, 2500 EB, La Haye). La responsabilité du contenu de cette publication revient entièrement aux auteurs et les opinions exprimées ne sont pas forcément celles du Ministère néerlandais de la coopération au développement ».

Préface

L'un des objectifs majeurs du projet soudano-sahélienne (PSS) est de contribuer au développement de systèmes de production végétale et animale durables et rentables en zone soudano-sahélienne, la zone comprise entre les isohyètes des 300 et 900 mm an⁻¹ en Afrique de l'Ouest. Dans cette zone, les deux types de production sont très fortement liées. La production d'herbes, de feuilles, de fruits et de tiges des pâturages, les cultures fourragères, les résidus de récolte et des produits agro-industriels servent d'aliments pour le bétail, tandis que le fumier et la traction animale, les sous-produits animaux, 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, du fait surtout de la médiocre fertilité du sol ([Penning de Vries & Djitèye, 1982](#) ; Van Keulen & Breman, 1990) à laquelle vient s'ajouter une grande variabilité pluviométrique (Vierich & Stoop, 1990). La pauvreté des sols est aggravée par une forte croissance démographique qui entraîne une surexploitation des terres et la dégradation des ressources naturelles, entravant encore plus le potentiel de production rurale. Sur les terres cultivées, les périodes de jachère sont écourtées, tandis que les quantités de fumure organique et d'engrais chimiques épandues ne suffisent pas pour restaurer la fertilité du sol (Van de Pol, 1992). Les pâturages sont surexploités, 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 le manque de fourrage de bonne qualité, notamment dans la saison sèche ([Penning de Vries & Djitèye, 1982](#)).

D'un point de vue technique, ces problèmes peuvent être résolus. 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 de matière organique ne s'en trouve 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 équilibrer le bilan des éléments nutritifs, une utilisation accrue d'engrais chimiques semble être la condition *sine qua non* d'un développement agricole durable.

En élevage, une productivité plus élevée est liée à une utilisation plus importante des suppléments alimentaires (résidus de récolte, cultures fourragères, produits agro-industriels) parallèlement à une diminution de la pression

sur les parcours naturels. Cette option nécessite cependant une production plus élevée de suppléments. Ainsi, l'élevage pourrait également profiter de l'apport des éléments nutritifs que ce soit directement au travers de son utilisation pour les cultures fourragères, les banques fourragères et les pâturages améliorées, ou indirectement, au travers de 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 élevé) de la production de résidus de récolte.

A l'heure actuelle, les solutions indiquées ne sont pas appliquées à une grande échelle, surtout à cause des frais impliqués, ce qui fait ressortir la nécessité d'analyser non seulement les aspects techniques ou agro-écologiques, mais aussi les aspects (socio-) économiques. Il s'agit notamment des facteurs pouvant stimuler une production agricole plus élevée, comme des prix rémunérateurs des produits principaux, l'accès aux marchés (infrastructure), la disponibilité et les prix bas des intrants (notamment des engrais chimiques). Au sein du projet PSS, c'est l'Equipe Modélisation des Systèmes qui a été chargée de cette tâche. L'équipe s'est fixée pour 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, des exigences de durabilité, des relations entre l'agriculture et l'élevage et des objectifs de développement de la région. La méthodologie permettant une telle analyse est la programmation linéaire à buts multiples.

1. Introduction

1.1. Les objectifs du rapport

Les objectifs spécifiques de l'équipe modélisation des systèmes (EMS) sont :

- Etudier la rentabilité économique de l'utilisation des intrants (azotés et phosphatés) dans l'intensification de l'agriculture et de l'élevage en zone soudano-sahélienne, en identifiant les options ou innovations techniques susceptibles de rentabiliser l'utilisation directe ou indirecte de ces intrants.
- Analyser les conditions socio-économiques permettant de favoriser une rentabilisation de l'utilisation des intrants.
- Analyser et vérifier la fiabilité et la faisabilité des options techniques rentables au niveau petite région et au niveau ferme.

La méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs de recherche utilise le modèle de Programmation Linéaire à Buts Multiples (PLBM) comme instrument d'analyse économique des systèmes de production à différents niveaux :

- Grande région (zone soudano-sahélienne)
- Petite région (cas du cercle de Koutiala)
- Ferme (typique dans le cercle de Koutiala).

Le Modèle de Programmation Linéaire à Buts Multiples est un instrument qui permet :

- d'une part, d'analyser et de dégager, au niveau des activités agro-pastorales, les différentes options techniques pour lesquelles une rentabilisation de l'utilisation des intrants azotés et phosphatés est possible et
- d'autre part, de définir en fonction des conditions socio-économiques et agro-écologiques, des stratégies de développement (ou combinaisons optimales d'activités) au niveau macro-économique (nation, région, petite région : cercle) et micro-économique (ferme), permettant une utilisation optimale des ressources disponibles pour la production agricole et animale. En effet, au niveau d'un pays ou d'une région, il existe toujours un conflit entre la multitude d'objectifs de développement rural par rapport à l'allocation des ressources naturelles.

Les pièces maîtresses de ce modèle PLBM sont des activités (cultures, pâturages et élevage) définies et décrites qui seront incluses et analysées avec ce modèle PLBM. Ces activités sont fonction des ressources naturelles de base, c'est-à-dire que ce sont les conditions d'environnements prévalantes qui déterminent, dans une large mesure, les activités à réaliser et dans quelles conditions. Finalement, le modèle PLBM déterminera les combinaisons optimales d'activités en fonction des ressources disponibles et des objectifs de développement. Les différentes étapes de la méthodologie générale de recherche de l'EMS est décrit au tableau 1.1.

Tableau 1.1. Les différentes étapes de la méthodologie générale de recherche de l'EMS.

Etapes :	Objectifs :	Résultats :
Ressources	description des : - ressources naturelles - ressources humaines	caractérisation quantitative : - types de sols - climat - population et main d'oeuvre
Activités	définition et description : - culture - élevage - pâturage	caractérisation quantitative : - agro-écologique - socio-économique - environnement
Modélisation	élaboration du modèle PLBM : - au niveau de la région soudano-sahélienne - au niveau du cercle de Koutiala - au niveau de la ferme	exploration quantitative des options : - en matière de possibilités de développement - en matière de contraintes au développement - les coûts d'opportunités d'un objectif politique en termes d'autres

Ce rapport décrit la procédure de quantification des activités de culture pour le modèle PLBM. Il explique comment les coefficients ont été dérivés et pourquoi, et justifie de même les hypothèses formulées sur ces activités dans la région soudano-sahélienne.

Un modèle baptisé « Générateur de coefficients techniques » (GCT) a été élaboré, dans le cadre du projet PSS, dans le but de « générer » les coefficients techniques pour le modèle PLBM. Le GCT a été programmé dans Excel 4.0 (Microsoft, 1992). Il inclut divers modules permettant la quantification des cultures, du bétail, de la pâture, ainsi que des activités de transformation et de transport. La génération de certains coefficients techniques s'appuie sur des hypothèses brutes, l'absence de connaissances sur les processus sous-jacents ne permettant pas de définir une base plus solide pour la quantification de certains coefficients techniques. La méthode appliquée pour générer les coefficients techniques est une combinaison de données scientifiques et de connaissances expérimentales. Ce dernier aspect peut être considéré comme étant le point faible du générateur, vu le caractère arbitraires des hypothèses formulées. Des efforts sont faits pour quantifier ces connaissances généralement tout à fait valables d'un point de vue qualitatif. Le GCT permet cependant aux utilisateurs potentiels du modèle d'ajuster les

paramètres et les données de bases pour y introduire les données quantitatives qui seraient obtenues par la suite.

1.2. Structure du rapport

Les activités culturelles sont structurées autour des intrants et des extrants. Le [chapitre 2](#) fournit une description générale des activités de production définies par l'EMS et utilisées dans le modèle PLBM décrit par Bakker *et al.* (1996b). Les points de départ et les hypothèses sont expliqués ainsi que les interactions entre les activités culturelles et les autres activités de production (par ex. l'élevage et le pâturage). Ce chapitre résume les critères appliqués aux activités culturelles et les variables distinctes qui leur sont liées. Une référence spéciale est faite à la quantification de la matière organique qui est un élément clé dans l'étude du projet PSS. Le chapitre 2 est surtout destiné aux lecteurs « pressés » qui veulent se faire une idée globale et rapide de la structure des activités de production définies et des composants des activités culturelles en particulier.

L'approche « ciblée » (Van Duivenbooden *et al.* 1991) a été appliquée pour la définition des activités culturelles. Le [chapitre 3](#) décrit les ressources naturelles de base de la zone soudano-sahélienne. Les ressources de base déterminent, dans une grande mesure, le potentiel de production et une description exhaustive de ces ressources est donc un préalable à la quantification de ce potentiel. Le [chapitre 4](#) explique comment les rendements cultureux ont été dérivés. En particulier, la quantification des disponibilités hydriques pour la production végétale y est abordée en détail. Dans le [chapitre 5](#), les intrants aux activités culturelles sont décrits, notamment les besoins en matière organique et en éléments nutritifs, la main d'oeuvre, la traction animale et le capital, ainsi que les intrants consommables. Les autres extrants, outre les rendements des cultures traités au [chapitre 4](#), sont discutés au [chapitre 6](#), ainsi que les résidus de récolte et les nutriments impliqués, et les pertes de sol par érosion. Les activités dites de transformation sont l'objet du [chapitre 7](#), à savoir celles relatives au transfert de matière organique et de nutriments entre les activités culturelles et d'élevage, permettant ainsi d'étudier les effets de l'intégration des deux activités, l'un des objectifs principaux du projet PSS.

2. Définition des activités

2.1. 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 moyens bien définis et quantifiés 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 surface cultivable, 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 des cultures 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 animale utilisée dans le modèle de PLBM, voir [Bakker *et al.*, 1996a.](#)

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 autre, fonction d'une combinaison de caractéristiques végétales, 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 (extrait) 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 2.2](#) 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 sur le long terme. 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 diminution 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 macronutriments (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 fertilisants 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 acceptable (basée sur les estimations PIRT 1983b) qui varie de 2 à 10 ton 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 repercute aussi sur les niveaux d'intrants (capital et main d'oeuvre) investis dans les activités de culture.

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 peuvent 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 illustré de manière sommaire sur la figure 2.1. 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.

Figure 2.1. 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.

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 main d'oeuvre et de contribution à la régénération des taux de matière organique 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 pools, le pool « résidus de récolte/fourrage » et le pool « matière organique/éléments nutritifs », comme illustré sur la figure 2.2. Les deux types de pools se retrouvent au niveau de la ferme et du champ. Trois activités fournissent des produits finaux de consommation et des sous-produits : la culture, l'élevage de troupeau et l'élevage d'embouche. Deux types d'activités ne fournissent que des sous-produits : le pâturage et la jachère. Six types d'activités sont utilisées pour transformer ou transporter les sous-produits : (i) l'activité de 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 l'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 à la terre, 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 pools de matière organique/nutriments et de résidus/fourrages. Le lien entre toutes ces activités est présenté à la figure 2.2 sous forme de diagramme relationnel des types d'activités définis. Les caractéristiques des différents types (critères de définition, unités et produits, intrants et extraits) présentées à la figure 2.2 sont résumées au tableau 2.2.

[Figure 2.2.](#) Diagramme relationnel des activités de production et de leurs sous-produits.

Les sous-produits, 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 de la région soudano-sahélienne.

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 :

1. le taux cible de matière organique qui doit être maintenu dans la couche supérieure du sol ;
2. 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;
3. 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 la matière organique fraîche est requise pour maintenir la teneur cible dans le sol. Comparé à un 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 1 800 kg ha⁻¹. Pour un sol sableux, il faut 1,6 fois plus de résidus.

Tableau 2.2. Définition des activités, leurs intrants et extrants et les unités d'expression.

Activités	critères de définition	intrants *)	unité	extrants *)	unité
Culture	sous-zone	terre	ha	produit principal (f)	kg ha ⁻¹
	climat	capital	FCFA 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 de l'azote	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	fourrage (c)	FCFA ha ⁻¹	lait et viande	kg UBT ⁻¹
	intensité	fourrage (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	fourrage (f)	kg	viande	kg UBT ⁻¹
	intensité	capital	FCFA 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	résidu (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	FCFA kg ⁻¹			
		boeufs de labour	bj kg ⁻¹			
Paillage en utilisant les résidus	sous-zone	résidu (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	
		capacité de récupérer de l'azote			kg N kg ⁻¹ residus	
Transport des résidus à la ferme	sous-zone	résidu	kg	résidu/fouillage (f)	kg	
	sol	main d'oeuvre	hj kg ⁻¹			
	culture	capital	FCFA kg ⁻¹			
	mode de transport					
Transport de matière organique au champ	climat	MOST (f)	UMO	MOST (c)	UMO	
	sol	NPK (f)	kg UMO ⁻¹	NPK (c)	kg UMO ⁻¹	
		capital	FCFA UMO ⁻¹			
	mode de transport	main d'oeuvre	hj UMO ⁻¹			

Achat d'engrais	capital	FCFA kg ⁻¹	NPK (c)	kg
Achat de suppléments	capital	FCFA kg ⁻¹	fouillage (f)	kg

*) (c) : au champ, (f) : à la ferme. ²⁾ hj = homme-jour ³⁾ bj = boeuf-jour

2.2. Approche de définition des activités culturelles

Pour pouvoir analyser 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 des activités liées aux cultures pluviales et inondées sont indiqués au tableau 2.3. Pour les cultures inondées, 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 2.3. Critères et variables des activités liées aux culture pluviales et inondées. Voir le texte pour l'explication des abréviations.

sous-zone	pluviosité	sol	culture	Niveau de production	utilisation de résidus	mesures conservation
SZ_11	sec	EC	andropogon	extensif	paillage	à plat
SZ_12	normal	GR	andropogon, repousse	semi-extensif	enfouissement	billons simples
SZ_13		GR_su	arachide	semi-intensif	brûlage	billons cloisonnés
SZ_21		LIAR	bourgou	intensif	broutage	
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

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 Est parce que la pluviométrie - l'un des facteurs climatiques principaux - varie surtout du Nord au Sud (de 300 à 900 mm par an). Voir aussi l'[annexe I](#) 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 pluies, 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 20 % des années les plus sèches, tandis que les années normales représentent 60 % des années de pluviosité moyenne dans 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 le [chapitre 3](#).

Les cultures

Les caractéristiques utilisées pour quantifier la production potentielle de quinze cultures sélectionnées sont : les cycles de croissance minimum et maximum, la durée des phases de 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 limitant (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, et le coefficient d'utilisation des nutriments. On suppose qu'au niveau intensif, le rendement des activités pluviales peut approcher 80 % d'un rendement limité par la disponibilité en eau. On suppose aussi qu'environ 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 et Djitèye \(1982\)](#). 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.

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) le transport des résidus de récoltes à la ferme pour l'affouragement du bétail, i.e. pour l'activité d'élevage, (v) la production de litière, 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 culturales 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 limitées 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 culturales 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 différentes mesures de conservation de l'eau et du sol. Les intrants et extrants ont été quantifiés pour les combinaisons possibles. 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'infructescence à la ferme en terme de MOST, le N, P K de l'infructescence à la ferme et la capacité à récupérer l'azote. Le tableau 2.4 présente cinq exemples d'activités de culture du sorgho, 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 à la [section 2.1](#), les activités culturales sont définies comme un objectif à atteindre, c'est à dire que l'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 2.4). 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 procède à

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 sub-optimal 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 à la culture, la biomasse est répartie en fonction de ses composants, les grains, les infrutescences, 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 infrutescences sont transformées en extrait « *MOST* ». Sur la base des teneurs en nutriments des infrutescences, on peut estimer les quantités de *N*, *P* et *K* comme extraits séparés (voir tableau 2.4). La « *capacité à récupérer l'azote* » représente la quantité de N pouvant être immobilisée par les composants d'infrutescences relativement pauvres en azote. Cet extrait peut être utilisé dans l'activité de production de litière, comme intrant, pour immobiliser l'azote du pissat des animaux des activités d'élevage.

Tableau 2.4. Quelques exemples de coefficients intrants/ extraits 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		LIAR	LIAR	LIAR	GR	GR
culture		sorgho	sorgho	sorgho	sorgho	sorgho
niveau de production		semi-intensif	semi-intensif	semi-extensif	semi-intensif	semi-intensif
utilisation des résidus		libre*)	libre*)	libre*)	libre*)	paillage
mesures de conservation de l'eau et du sol		à plat	cloison	cloison	cloison	cloison
EXTRANTS :						
produit principal	kg ha ⁻¹	2 475	3 065	1 039	2 003	2 003
résidus (champ)	kg ha ⁻¹	4 339	5 370	2 420	3 514	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 à 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	FCFA ha ⁻¹ ₁	30 170	9 802	5 010	8 640	7 260

*) 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 à la [section 2.1](#). L'intrant « *MOST* » est requis pour maintenir le taux de matière organique du sol au niveau ciblé. On a constaté que les taux cibles sont plus élevés que les taux courants. 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 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 leur 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.*, 1981). 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 2.4.

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 NPK, 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.

3. Ressources

Ce chapitre décrit brièvement les ressources de base de la région soudano-sahélienne, c-à-d. la quantité de sol disponible, sa qualité et le climat. Ces ressources déterminent dans une large mesure le potentiel de production des différentes zones de la région soudano-sahélienne et la connaissance de leurs caractéristiques est donc essentielle à la définition des activités culturelles.

La zone d'étude, la zone soudano-Sahélienne du Mali, comprise les isohyètes de 300 mm et 900 mm an⁻¹, avec une superficie totale de 4,56 millions de km² et une population totale d'environ 5,1 million habitants, soit près de 70 % de la population malienne. Cette zone est vaste et il ya des grandes variations en climat (pluviométrie), sols, eaux et population qui sont des paramètres influençant fortement les possibilités de production agriculture. Pour tenir compte de la diversité en possibilités de production agricole dans cette zone, elle a été découpée en 15 unités plus homogènes, dénommées sous-zones. La 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 en se basant autant que possible sur les limites administratives. Comme beaucoup de données statistiques se trouvent au niveau des régions administratives, ce choix devait faciliter la quantification des ressources par sous-zone ainsi que la comparaison des résultats du modèle PLBM (l'allocation optimale des ressources) avec la situation actuelle. Les frontières entre les sous-zones sont néanmoins les résultats d'un compromis entre l'utilisation des limites administratives et celles des unités agro-écologiques définis par le PIRT (1983b). La carte et les tableaux en [annexe I](#) présentent la délimitation des différentes sous-zones dans la zone d'étude. Le code des sous-zones 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 30 fait une exception par rapport aux sous-zones 31 et 32.

3.1. Les sols

La description et la distribution des sols dans la zone soudano-sahélienne se fondent essentiellement sur l'inventaire des ressources terrestres effectué par le projet PIRT (PIRT, 1983a, b, c). Cependant, la partie Nord-Est de la zone n'était pas comprise dans l'inventaire du PIRT. Pour cette partie c'est la carte mondiale des sols de la FAO/UNESCO (1974-1981) qui a été utilisée. La transformation sol FAO/UNESCO an sol-PIRT est donnée en

annexe II. La classification du PIRT basée sur la taxonomie américaine des sols, a été prise comme base de classification car leur inventaire concerne 85 % de zone d'étude et est plus détaillée que celle de la FAO (échelle 1 : 500 000 comparativement 1 : 5 000 000). Dans la classification du PIRT, 68 unités sol/végétation ont été distinguées et réparties en 10 grands groupes :

D Dunes mortes ;
 DA Dunes aplanies ;
 PA Plaines avec matériaux argileux ;
 PL Plaines avec matériaux limoneux fins ;
 PS Plaines avec matériaux limono-sableux ;
 TC Terrains sur cuirasse latéritique ;
 TH Terrains hydromorphes, faiblement ou non inondés ;
 TI Terrains inondés ;
 TR Terrains rocheux ;
 X Terrains spéciaux.

Pour la définition et la description quantitative des activités, un niveau de détails comme celui du PIRT n'est pas utile parce qu'il inclut des caractéristiques assez sensibles aux changements, tandis que pour l'exploration des possibilités des systèmes de production durable, il est préférable de fixer des seuils à maintenir pour certaines caractéristiques fragiles. De plus, l'inventaire du PIRT a été fait avant les années de sécheresse 1983 et 1984, tandis que les végétations ont probablement souffert sévèrement de cette sécheresse et de surpâturage bien après (Breman & Traoré, 1987).

Les éléments de caractérisation retenus sont stables et ont surtout été choisis pour leur influence sur la quantité d'eau disponible pour la culture. Ce sont : la **texture du sol, sa profondeur, la présence de gravillons et son aptitude à être inondé**. De cette façon, les 68 unités sol/végétation de PIRT ont été regroupées en 13 types de sols aptes à la production primaire et en 2 substrats non-utilisables pour ce but, les roches ou regs et les surfaces d'eau. Ces substrats sont présentés au tableau 3.1.

Tableau 3.1. Substrats retenus, avec leur code et correspondance par rapport à la classification du PIRT.

Substrat utilisé	Code	Substrat PIRT	Superficie totale	
			(100 km ²)	%
terres d'écoulement	EC	TH 2, 3, 6-8 ; TI 3, 5	262	5,7
Gravillonnaire	GR	TC 1- 4, 6 ; TR 1,2, 4, 7, 8	606	13,1
Gravillonnaire superficiel	GR_su	TC 5 ; TR 9	122	2,6
Superficiel	SU	TR 5,6	321	6,9
Limon argileux	LIAR	PA 2 ; PL 9, 13 ; PS 2	162	3,5
Limon limoneux	LILI	PA1,3 ; PL 3,7,8,10-12 ; TH1,4 ; X1	346	7,5
Limon sableux ; couche supérieure fine	LISA_f	PL 1,2,4-6 ; PS 1,3 ; TC 7 ; TH 5	679	14,7
Limon sableux ; couche supérieure grossière	LISA_g	DA 1-5	629	13,6

Sable	SA	D 1-4	517	11,2
Sable limoneux	SALI	D 5-7	331	7,2
Superficiel incliné	SU_inc	TR 3	46	1,0
Terres inondées	IN_h	TI 1, 2, 4, 6, 7	171	3,7
Roche ou reg	INAPT	X 2-5	390	8,4
Eau	EAU	X 6	25	0,5
Total zone soudano-sahélienne	-	-	4 607	100

Les sols d'écoulement (EC) sont des types de sols où il y a un écoulement d'eau. Sur ces types de sol l'infiltration est donc plus élevée que la pluviométrie. Ils correspondent aux quelques « terrains inondés »(TI) et aux « 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. On distingue ainsi les sols limons sableux grossiers et fins : LISA-g et LISA-f.

Limons : Les limons forment un petit groupe qu'on a voulu séparer quand même des limons argileux. Ceci pas seulement sur la base d'une 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.

Sols inondables : Les sols inondables constituent un groupe de substrats où les cultures irriguées peuvent être pratiquées. On a distingué 7 types de sol, selon l'hauteur des crues. 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.

Voir l'[annexe I](#) pour la carte de la région soudano-sahélienne et la distribution des types de sol et des sous-zones.

3.1.1. Caractéristiques principales du sol : texture, profondeur, présence de gravillons et aptitude à être inondé

Les caractéristiques des 12 types de sols utilisés pour la définition des activités culturales sont décrites au tableau 3.2. Ce paragraphe ne présente que les critères de classification de ces sols.

Texture

Un critère de classification des sols est sa texture. C'est elle qui détermine en grande partie la capacité d'infiltration et de rétention d'eau de ce dernier et partant, la production potentielle limitée par l'eau.

Concernant la texture, on distingue deux couches de sol : la couche supérieure et le sous-sol. La profondeur de la couche supérieure est de 0,25 m. La profondeur de la couche de sous-sol est variable, et on suppose que c'est elle qui contient le plus grand réservoir d'eau. On peut donc dire que c'est la texture du sous-sol qui détermine la capacité de rétention d'eau de ce dernier. Par conséquent, les sols sont classés d'abord selon la texture du sous-sol. La texture de la couche supérieure est considérée avoir un effet négligeable sur la capacité de rétention d'eau de tout le profil. Par contre, son effet sur la capacité d'infiltration est considéré important. C'est pourquoi la texture de la couche supérieure est aussi un critère principal de la classification.

La texture ou granulométrie a été exprimée premièrement en pourcentages de sable (50-2 000 µm), limon (2-50 µm) et argile (<2µm) à partir de groupes texturaux spécifiés par le PIRT en appliquant le diagramme triangulaire de texture des sols de la Taxonomie des Sols des Etats Unis comme indiqué dans PIRT (1983b). Cependant, pour les calculs de l'érosion, la distinction en trois fractions granulométriques ne suffit pas. La taille de deux fractions additionnelles, sable fin (50-100 µm) et limon fin (2-20 µm) a donc été dérivée sur la base de quelques données disponibles sur la répartition de ces fractions (PIRT, 1983c). La granulométrie retenue est présentée au tableau 3.2.

Les pourcentages de sable dans le sous-sol des sols identifiées varient entre 10 % pour les SU_inc à 93 % pour les sols SA. Dans la couche supérieure, ces pourcentages sont même plus élevés, présentant un minimum de 28 % (EC) et un maximum de 93 % (SA). La teneur en argile des sols est en général inférieure à la teneur en sable, variant de 5 % (SA) à un maximum de 37 % pour les sols EC dans le sous-sol. Dans la couche supérieure, les teneurs en argile sont même inférieures, avec une teneur minimum de 5 % (SA) et un maximum de 20 % seulement (EC).

Profondeur

La profondeur d'enracinement détermine le niveau de disponibilité hydrique pour les cultures. Le PIRT (1986a, b, c) considère que les sols profonds doivent présenter une profondeur d'enracinement d'au moins un mètre. Dans cette étude, la profondeur d'enracinement maximum de ces sols « profonds » est supposée être de 2 m ou plus.

La majorité des types de sols identifiées ont une profondeur d'enracinement de 2 m. Les substrats superficiels (SU) et superficiels inclinés (SU_inc) ainsi que les substrats comprenant des gravillons dans le sous-sol (GR et GR_su) présentent des profondeurs d'enracinement allant de 18 à 58 cm, ce qui limite considérablement les disponibilités en eau.

Gravillons

La fraction de gravillons influence la capacité de rétention d'eau du sol, en réduisant la teneur hydrique gravimétrique à la capacité au champ (voir aussi le [paragraphe 3.1.2](#)). Deux sols seulement contiennent des gravillons, GR et GR_su, jusqu'à 75 % dans le sous-sol de GR_su. Les deux types de sols constituent 15 % de la région soudano-sahélienne (tableau 3.1).

Inondation

L'intérieur de la région soudano-sahélienne est caractérisée par un delta alimenté par le fleuve Niger. Les sous-zones SZ_22, 24, 30, 31, 33, 34, 35 et 36 peuvent donc porter des cultures inondées. Dans chaque région, la période et le niveau de submersion sont basés sur Cissé & Gosseye (1990). Pour un type de sol (IN_h), sept niveaux de submersion ont été identifiés ; ils sont présentés au tableau 3.3. Ces niveaux caractérisent la crue. Par exemple, le type de sol IN_h1 est submergé lorsque le niveau d'eau dépasse les 2,63 m alors qu'il doit dépasser les 3,6 m pour que le type de sol IN_h2 soit submergé.

Tableau 3.3. Sept niveaux de submersion (en cm) du type de sol inondé (IN_h).

Hauteur de la crue :	IN_h1	IN_h2	IN_h3	IN_h4	IN_h5	IN_h6	IN_h7
début de l'inondation	263	360	480	510	555	600	630
inondation complète	360	480	510	555	600	630	660

Tableau 3.2. Données sur les sols utilisées pour la génération des coefficients techniques des activités.

Caractéristiques ;	unité	EC	GR	GR_su	LIAR	LILI	LISA_f	LISA_g	SA	SALI	SU	SU_inc	IN_h
Profondeur	cm	200	46	18	200	200	200	200	200	200	58	38	200
Pente	%	2	3	4	2	2	2	5	19	19	4	38	0
Texture													
sous-sol													
sable	%	23	42	43	35	12	58	63	93	80	35	10	52
limon	%	40	35	43	37	58	17	28	3	13	37	58	35
argile	%	37	24	15	29	30	25	10	5	8	28	33	13
gravillon	%	0	54	75	0	0	0	0	0	0	0	0	0
couche supérieure													
sable (50-2 000 mm)	%	28	60	43	60	40	63	80	93	80	54	43	52
limon (2-50 mm)	%	52	30	43	29	42	27	13	3	13	34	43	35
argile (< 2 mm)	%	20	11	15	11	18	10	8	5	8	12	15	13
gravillon	%	0	9	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0

sable fin (50-100 mm)	%	14	30	22	31	20	32	41	47	41	27	22	26
limon fin (2-20 mm)	%	20	11	16	11	16	10	5	1	5	13	16	13

Caractéristiques hydriques

sous-sol

champ	mm m ⁻¹	407	138	77	348	461	231	211	64	126	348	469	263
flétrissement	mm m ⁻¹	215	58	24	167	174	145	64	38	52	166	188	79

couche supérieure

champ	mm m ⁻¹	382	226	309	222	321	211	126	64	126	254	309	263
flétrissement	mm m ⁻¹	120	69	92	68	109	65	51	38	51	77	92	79

plan d'infiltration

Capacité d'absorption initiale	(mm min ^{-0,5})	0,0	4,6	3,1	4,6	3,1	4,6	5,1	13,2	5,1	4,6	3,1	3,1
Capacité d'absorption finale	(mm min ^{-0,5})	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,5	4,0	2,5	1,0	1,0	1,0
Capacité de stockage	(mm)	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	3,5	2,0	1,0	1,0	1,0

Caractéristiques chimiques

pH couche supérieure		5,8	5,7	5,3	5,5	6,6	6,3	6,4	6,5	5,9	6,9	7,0	6,0
pH couche sous-sol		6,2	5,2	6,3	5,2	6,1	5,8	6,6	7,0	5,7	7,5	7,0	6,0
P total dans le sol	mg kg ⁻¹	125	100	100	125	100	110	100	100	100	100	100	125
K assimilable dans le sol	mg kg ⁻¹	100	50	50	100	75	75	50	50	50	50	50	100
Fixation de P (M=moyen, F=faible)		M	M	F	M	M	M	F	F	F	F	M	F

Taux de matière organique à maintenir (Feller, pour cultures)	%	2,2	1,3	1,7	1,3	1,9	1,2	0,8	0,5	0,8	1,4	1,7	0,5
Inondation (N=non, O=Oui)													
inondation		N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	O
Données pour la formule de Wischmeier													
perméabilité		5	4	4	4	5	3	3	1	1	5	5	3
structure		3	3	2	3,5	3	3,5	4	3,5	3,5	2	2,5	3,5
courbe de niveau : facteur P (billons simple)		0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,8	0,8	0,5	1,0	1
tolérance de pertes par érosion	t ha ⁻¹ an ⁻¹	10	5	3	10	10	10	10	10	10	7	5	0
Aptitude des substrats à la culture du													
mil		-	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-
sorgho		+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-
maïs		+	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-
riz		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
niébé graine		+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-
niébé fourragère		+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-
arachide		-	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-
coton		+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
andropogon		+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-
andropogon repousse		+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-
stylosanthos		+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-
riz submersion non-contrôlée		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
riz submersion contrôlée		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
riz irrigué à gravité		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
riz irrigué à la pompe		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
bourgou		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+

culture de décrue

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

+

3.1.2. Caractéristiques dérivées ou secondaires

En plus des caractéristiques principales, il existe aussi caractéristiques dérivées et secondaires. Les caractéristiques dérivées de la texture sont la capacité de rétention d'eau, la capacité d'infiltration, la perméabilité et la structure. Une caractéristique indépendante, mais considérée cependant comme stable, est la pente des substrats.

Capacité de rétention d'eau

L'eau utile pour les plantes est égale à la quantité retenue à la capacité au champ ($pF=2,5$), moins la quantité retenue au point de flétrissement ($pF=4,2$). Bien que la matière organique du sol peut aussi jouer un rôle, ces deux points sont déterminés selon une relation donnée par Brouwers & Keita (1976) qui tient uniquement compte des teneurs en sable et argile, comme suit :

$$\text{TEC} = (36,97 - 0,35 * S) * \text{DS} * \text{DE} * 10 \quad (3.1)$$

$$\text{TEF} = (0,74 + 0,39 * A) * \text{DS} * \text{DE} * 10 \quad (3.2)$$

$$\text{EUT} = \text{TEC} - \text{TEF} \quad (3.3)$$

où :

TEC = teneur en eau à la capacité au champ (mm m^{-1}) ;

TEF = teneur en eau au point de flétrissement (mm m^{-1}) ;

EUT = eau utile pour les plantes (mm m^{-1}) ;

S = pourcentage sable ;

A = pourcentage argile ;

DS = densité spécifique moyenne des sols ($1,4 \text{ kg l}^{-1}$) ;

DE = densité spécifique de l'eau (1 kg l^{-1}).

La teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement a été ajustée pour les sols gravillonnaires (GR and GR_su) à l'aide d'un facteur de multiplication défini comme $(1 - \text{fraction de gravillons})$, pour tenir compte de la teneur hydrique gravimétrique réduite des sols gravillonnaires. Le tableau 3.2 présente les capacités au champ et les points de flétrissement des types de sols de la région soudano-sahélienne.

Capacité d'infiltration

La quantité infiltrée d'un événement pluvieux dépend, outre l'intensité et la durée de la pluie, de la capacité d'infiltration du sol. A son tour, cette capacité dépend de la capacité d'absorption et de la capacité de stockage en surface. Ces deux capacités dépendent, quant à elles, de la structure et de la rugosité du sol. La première, la capacité d'absorption des sols est fonction du potentiel matriciel et de gravité. Le potentiel matriciel est exprimé par la densité de tassement du sol et la densité spécifique des particules du sol. L'influence des forces matricielles est appelée sorptivité et indique à quel taux le sol absorbe l'eau si la succion matricielle est la principale force qui

s'exerce (Keulen & Wolf, 1986). Les sols facilement encroûtés, les sols sablo-limoneux à faible teneur en matière organique dénotent généralement une faible sorptivité. Des mesures prises au début de la saison culturale et de croissance peuvent améliorer la sorption (et ainsi la capacité d'infiltration du sol) en accroissant la rugosité de la couche supérieure du sol. C'est pourquoi, deux capacités d'absorption ont été définies, l'une se référant à la période suivant la préparation du sol - la capacité d'absorption initiale - et l'autre se référant à la période suivante, pendant la saison de croissance - la capacité d'absorption finale (voir aussi le [paragraphe 4.1.3](#)). La stabilité de la structure dépend du taux de matière organique dans le sol, mais il n'en est pas tenu compte par manque de données quantitatives.

Des données sur la capacité d'absorption ou sorptivité et la capacité de stockage pour les substrats PIRT manquent. Des valeurs moyennes ont été données par [Breman & De Ridder \(1991\)](#) pour les différentes classes texturales des couches supérieures des sols. Il faut faire attention cependant, parce qu'il s'agit ici de valeurs applicables aux sols non-perturbés. Pour les sols labourés, ces valeurs peuvent être bien plus élevées. En fait, Driessen (1986) présente des chiffres de sorptivité pour quelques classes texturales, de 2 à 5 fois plus élevés. Pour le moment donc, les valeurs indiquées par [Breman & De Ridder \(1991\)](#) ont été utilisées afin de ne pas sous-estimer le ruissellement.

Les sols situés en bas des toposéquences sont supposés recevoir l'eau de ruissellement des terres voisines. L'estimation de la position des substrats dans les toposéquences a été effectuée sur la base de données fournies par des experts. Les substrats retenus pour recevoir l'eau de ruissellement sont les EC. Le ruissellement sur ce type de sol n'est pas calculé à partir de la capacité d'infiltration. Vu l'absence de données, l'apport d'eau de ruissellement sur ce sol a été fixé à 25 % de la pluviométrie annuelle.

Les sols inondables sont traités d'une manière différente : soit, ils sont utilisés pour les cultures irriguées (plusieurs niveaux de gestion de l'eau) soit, pour les cultures de décrue. L'infiltration ne joue pas un rôle pour la disponibilité en eau pour ces types de cultures.

Perméabilité et structure

L'érosivité des sols dépend, selon Wischmeier (dans Roose, 1977), outre de la texture et du taux de matière organique, de leur perméabilité et de leur structure. Wischmeier distingue pour la perméabilité, 6 classes (entre parenthèses, les facteurs de perméabilité correspondant aux nombres indiqués au tableau 3.2) : rapide (1), modérée à rapide (2), modérée (3), lente à modérée (4), lente (5), et très lente (6).

Pour la structure, 4 classes sont distinguées entre parenthèses, les coefficients de structure du sol et les nombres portés au tableau 3.2) : grumeleux (1), finement polyédrique (2), polyédrique moyen à grossier (3), et colonne, feuilletée ou massive (4).

La classification de la perméabilité a été faite à partir des données du PIRT sur la conduction hydraulique, celle de la structure à partir des descriptions de la structure des couches supérieures. Les valeurs pour les sols indiquées au tableau 3.2 sont les moyennes pondérées des substrats PIRT qui en font partie.

Pente

La plus grande importance de la pente est liée au risque d'érosion qui augmente fortement avec sa déclivité. Pour

chaque substrat PIRT, la pente a été donnée. Les résultats sont présentés au tableau 3.2. La pente d'un sol indiqué au tableau 3.2 est la moyenne pondérée des substrats PIRT qui en font partie. Les substrats SA, SALI and SU_inc, en particulier, figurent sur cette partie de la toposéquence à forte déclivité.

Taux de matière organique

Bien que le rôle exact de la matière organique dans le sol soit insuffisamment connu, on suppose que sa teneur joue un rôle essentiel dans la dynamique des éléments nutritifs du sol (Jones, 1976 ; De Ridder & Van Keulen, 1990 ; Bationo & Mokwunye, 1991). Les teneurs courantes en matière organiques des sols sahéliens sont de 0,5 %, du fait en partie des pratiques agricoles érosives du passé. On suppose que ces teneurs sont trop faibles pour supporter un système agricole productif dans la région soudano-sahélienne. Pour déterminer la teneur en matière organique d'un sol pouvant supporter un système agricole productif dans le futur, on utilise une équation de Feller *et al.* (1991) permettant d'estimer la teneur en matière organique dans des sols non dégradés. Ces auteurs ont recherché la relation existant entre le taux d'argile et celui de matière organique pour plusieurs types de sols cultivés (sans jachère de plus de cinq ans et sans amendements organique). Ils ont découvert, que dans les conditions prévalant en Afrique de l'Ouest (600-3 000 mm), la teneur en matière organique des sols cultivés dépendaient largement de la texture du sol et peu du climat :

$$MO = (1,32 + 0,28 * (ARG + SAB)) / 5,8 \quad (3.4)$$

Où :

MO = teneur cible en matière organique

ARG = taux d'argile dans la couche supérieure

SAB = taux de sable fin dans la couche supérieure

Les résultats sont présentés au tableau 3.2. Il faut noter que ces pourcentages sont en général deux fois plus élevés que les pourcentages réels. Cependant, les pourcentages présentés sont deux fois plus bas que les pourcentages de matière organique évalués en utilisant l'approche de Pieri (1989). A souligner que les teneurs dérivées de matière organique sont considérées comme des teneurs **cibles** qui doivent être maintenues dans un système agro-écologique durable. Il faut noter aussi que les teneurs cibles en matière organique concernent la couche supérieure du sol d'une épaisseur de 0,25 m (voir [paragraphe 3.1.1](#)). La question de savoir comment ces teneurs ont été obtenues est encore sans réponse. Normalement, des quantités plus élevées de matière organiques sont nécessaires pour améliorer la teneur de matière organique dans le sol (De Ridder & Van Keulen, 1990). Il n'entre pas dans les attributions de l'EMS de répondre à cette question. Le but de sa recherche est *d'explorer* les options agro-écologiques durables d'utilisation des terres pour l'avenir. On peut s'attendre cependant qu'au regard des quantités de matière organique requises pour *maintenir* les teneurs cibles, le problème des faibles teneurs actuelles dans les sols de la région soudano-sahélienne ne pourra pas être longtemps rester sans solution.

3.1.3. Aptitude des substrats pour les cultures

Une classification d'aptitude des terres a été développée par le PIRT (1983b). Elle est utilisée pour indiquer les restrictions d'utilisation des sols pour l'agriculture. Cette classification est une adaptation du Land Capability Classification System du U.S. National Cooperative Survey (Soil Conservation Service, 1981). Les aptitudes des sols sont en premier lieu basées sur la capacité de ces derniers à produire être cultivés sans se dégrader après une certaine période de temps. Les restrictions principales sont le surplus d'eau, c'est-à-dire la culture du mil sur les

sols EC sensibles à l'engorgement, ou la pénurie d'eau, c'est à dire les sols GR_su peu profonds détenant une faible capacité de rétention d'eau. Sur le tableau 3.2, les combinaisons culture/sol convenant à la production végétale sont indiquées par un '+'. Il faut noter cependant que les cultures irriguées peuvent être pratiquées sur des sols inondés (IN_h). Les sols GR_su ne conviennent qu'à la production de pâtures.

3.2. Le climat

C'est le climat qui détermine, ensemble avec le sol, les potentialités de production primaire. Les 15 sous-zones sont orientées d'Ouest en Est, parce que la pluviométrie varie surtout du Nord au Sud. (Par définition, de 300 à 900 mm par an). Chaque sous-zone peut être considérée comme une zone climatique avec un climat distinct et connu. Les paramètres climatiques importants sont : l'insolation, la température, la pluviométrie, l'humidité et le vent. Ces paramètres ne diffèrent pas d'une année sur l'autre de manière significative (Hoogmoed & Stroosnijder, 1984). Sur une base annuelle, les précipitations sont le facteur climatique le plus variable. Pour les calculs de rendements limité par l'eau, on a utilisé des données décennales (moyennes de 30 à 40 ans, dépendant de la station) pour la pluviométrie, le nombre de jours de pluie, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et le déficit en pression de vapeur d'eau (DPV). L'évapotranspiration potentielle décennale est calculée sur base de l'équation de Penman (Van Kraalingen & Stol, 1996), et le déficit en pression de vapeur d'eau décennale est dérivé de Goudriaan (1977). Le déficit en pression de vapeur d'eau est la différence entre la pression de vapeur d'eau saturée et la pression de vapeur d'eau réelle.

Comme chez Cissé et Gosseye (1990), les activités culturales sont décrites pour des années de pluviométries normales et sèches, afin de tenir compte de la notion de risque liée à l'agriculture pluviale. Une année de précipitations égale à la moyenne est une année normale, une année de précipitations inférieure à la moyenne est une année sèche. Les années sèches constituent 20 % des années ayant connu les précipitations les plus faibles pendant la période de 1961 à 1990, tandis que les années normales constituent 60 % des années de précipitations moyennes pendant la même période. Les précipitations, le nombre de jours de pluies, l'évapotranspiration potentielle et le déficit en pression de vapeur d'eau sont exprimés par décades (10 ou 11 jours) pour les deux types d'années. Les moyennes mensuelles de pluviométrie pour les deux types d'années par sous-zone sont présentés au tableau 3.4. Ces données sont calculées à partir des enregistrements quotidiens de la Direction Nationale de la Météorologie. L'[annexe III](#) donne pour chacune des stations pluviométriques (pour lesquelles les données ont été obtenues) : Le code et nom de la station, sa longitude et sa latitude, le nombre d'années pour lesquelles les données étaient disponibles, la pluviosité mensuelle moyenne pour les mois d'Avril à Octobre, et la pluviosité annuelle moyenne. A partir de ces données la pluviosité annuelle moyenne a été estimée pour chaque sous-zone ou à proximité dans certains cas (voir l'[annexe III](#)).

Tableau 3.4. Pluviométrie (mm) moyenne par sous-zone pour deux types d'années, sèche (se) et normal (no).

Sous-zone	Type d'année	Mois						Total annuel
		mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	
SZ_11	no	7	46	125	151	103	28	462
	se	1	36	84	80	96	19	318
SZ_12	no	12	65	170	194	123	40	605
	se	7	58	98	135	98	26	423

SZ_13	no	23	86	191	229	162	52	744
	se	12	93	128	163	118	40	555
SZ_21	no	9	41	105	128	79	21	385
	se	5	31	61	82	48	12	239
SZ_22	no	15	51	114	149	81	19	430
	se	10	31	82	93	35	5	256
SZ_23	no	24	66	135	174	106	28	534
	se	14	51	99	112	61	17	353
SZ_24	no	33	96	168	217	158	44	719
	se	21	84	128	166	109	34	544
SZ_30	no	4	16	42	76	37	5	181
	se	1	12	34	46	21	5	119
SZ_31	no	3	15	42	55	29	4	149
	se	1	10	25	31	19	2	87
SZ_32	no	7	23	63	100	49	8	249
	se	6	14	36	62	32	3	153
SZ_33	no	15	39	102	130	81	16	384
	se	5	38	73	91	30	10	248
SZ_34	no	17	57	113	140	86	21	437
	se	9	45	78	100	58	14	305
SZ_35	no	29	70	140	179	121	24	567
	se	20	51	100	127	70	12	383
SZ_36	no	38	107	175	212	151	36	723
	se	27	70	132	162	109	25	525
SZ_37	no	67	111	209	222	173	53	840
	se	51	96	143	179	124	46	642

Les pluies commencent plus tard et cessent plus tôt dans l'année lorsqu'on se dirige vers le Nord de la région soudano-sahélienne. Dans le Sud (e.g. SZ_37) les pluies commencent au début de mai et se terminent vers mi-octobre, totalisant 840 mm pendant une année normale de pluie. Au Nord (e.g. SZ_30), les pluies ne commencent qu'en juin / juillet et cessent début septembre, totalisant 181 mm dans une année normale.

4. Rendement des cultures

Dans la région soudano-sahélienne, les rendements sont essentiellement déterminés par deux facteurs : la disponibilité en eau et la disponibilité en éléments nutritifs. Concernant la production végétale limitée par l'eau, les rendements dépendent uniquement de la disponibilité de cette dernière, l'apport de nutriments étant supposé

optimal. En ce qui concerne la production végétale limitée par les éléments nutritifs, les rendements dépendent de la seule disponibilité de ces derniers.

La production limitée par l'eau peut être simulée par des modèles dynamiques assez détaillés comme celui de SOW (1985), utilisé pour estimer le potentiel des ressources du Burkina Faso, ou celui d'Erenstein (1990), utilisé dans l'étude de la cinquième région du Mali (Van Duivenbooden *et al.*, 1991). Il est généralement très difficile d'estimer une production limitée par les nutriments étant donné les interactions complexes existant entre les différents facteurs de croissance impliqués. Cependant, vu la fiabilité et la qualité des données disponibles sur les ressources, vu aussi le fait que ces modèles n'ont jamais été étalonnés ou validés et qu'ils n'existent que pour quelques cultures, ces modèles ne sont pas appliqués. Une approche plus simple a donc été choisie pour déterminer ce qu'on appelle les rendements « cibles » des activités culturales. Ces rendements déterminent les autres intrants et extrants décrits aux [chapitre 5](#) et [chapitre 6](#), et jouent par conséquent un rôle important dans la définition de ces activités.

Un modèle statique de croissance est utilisé, basé sur l'eau disponible pendant une certaine période de l'année, le déficit de pression de vapeur, les caractéristiques végétales spécifiques ainsi que sur la méthode décrite par Tanner & Sinclair (1983) pour estimer la limite supérieure de la production de biomasse des cultures inondées. Cette production de biomasse par les activités végétales dans des conditions de submersion est basée sur le niveau de production potentiel déterminé par la radiation et les caractéristiques génétiques des cultures.

En dessous de ces seuils, les niveaux de production sont définis de sorte à réaliser l'objectif global des options de développement agricoles dans le cadre du modèle PLBM (voir la [section 4.2](#)). Les paragraphes suivants expliquent comment la quantité d'eau disponible, le début et la fin de la saison de croissance, la quantité utilisable d'eau pendant la saison de croissance, la biomasse effective et sa répartition par rapport aux différents composants des cultures.

4.1. L'eau disponible pour la plante

Dans l'agriculture pluviale, l'eau disponible pour la plante est l'eau de pluie, moins l'eau ruisselé, percolée et évaporée. Pour le calcul de l'eau disponible, la fraction d'eau ruisselée est déterminée en premier (par. 4.1.1). L'eau infiltrée pendant la saison de croissance peut être ensuite évaluée pour une culture spécifique (par. 4.1.2). De cette quantité, une partie peut percoler en dessous de la zone d'enracinement et une partie disparaître par évaporation (par. 4.1.3). La manière de déterminer la production cible de biomasse est présentée au [paragraphe 4.1.4](#).

4.1.1. Le ruissellement

Le coefficient de ruissellement des substrats est calculé selon une méthode élaborée par [Bremner & De Ridder \(1991\)](#), basée sur [Penning de Vries & Djitéye \(1981\)](#), Stroosnijder & Hoogmoed (1984) et Hoogmoed & Stroosnijder (1984). Chaque étape de la méthode est présentée. Il est à noter que, dans les parties inférieures de la toposéquence (sols EC), les sols accueillent l'eau des terrains adjacents. Ces dépressions sont donc considérées comme des zones de captage d'eau, avec un apport hydrique fixe s'élevant à 25 % des précipitations annuelles.

4.1.1.1. L'intensité et la durée des pluies

Pour pouvoir estimer la ruissellement annuel, il est nécessaire de connaître l'intensité des événements pluvieux, ce facteur déterminant l'énergie cinétique à la surface du sol, générant l'encroûtement et aggravant de ce fait le ruissellement. Des données ont été collectées pendant trois ans, à Niono (au milieu de la zone). Pour pouvoir les extrapoler aux 15 sous-zones, une classification par importance des événements pluvieux mesurés à Niono a été faite. Trois classes ont été retenues : événements pluvieux de moins de 10 mm, événements pluvieux entre 10 et 20 mm, événements pluvieux de plus de 20 mm. La quantité totale d'eau par classe d'événements pluvieux et le nombre de jours de pluie pour chaque catégorie est indiquée au tableau 4.1 pour les deux types d'années de précipitations.

Tableau 4.1. Précipitations (mm) par classe d'événements pluvieux (P_i) et nombre de jours de pluie dans chaque classe pour deux types d'années de précipitations.

Sous-zone	Type d'année	Précipitations par classe d'événements pluvieux			Nombre de jours de précipitations		
		$P_i < 10$	$10 < P_i < 20$	$P_i > 20$	$P_i < 10$	$10 < P_i < 20$	$P_i > 20$
SZ_11	no	87	122	252	25	8	8
	se	77	88	153	23	6	5
SZ_12	no	93	147	364	23	10	11
	se	98	121	204	26	8	6
SZ_13	no	104	178	462	22	12	13
	se	88	153	319	19	10	9
SZ_21	no	80	104	201	24	8	6
	se	73	69	97	25	5	3
SZ_22	no	85	108	236	21	8	7
	se	73	68	115	20	5	4
SZ_23	no	99	139	295	24	10	9
	se	85	97	171	21	7	5
SZ_24	no	125	190	405	32	13	12
	se	117	151	277	30	11	9
SZ_30	no	59	46	76	16	3	2
	se	53	34	32	15	2	1
SZ_31	no	54	40	54	18	3	2
	se	45	21	22	15	2	1
SZ_32	no	63	61	126	16	4	4
	se	63	46	45	17	3	2
SZ_33	no	86	107	191	23	8	6
	se	75	68	105	19	5	3

SZ_34	no	87	120	229	24	9	7
	se	79	75	151	21	5	5
SZ_35	no	107	147	314	31	10	10
	se	94	113	176	28	8	6
SZ_36	no	131	180	412	38	13	13
	se	115	146	264	31	10	9
SZ_37	no	148	225	467	38	16	14
	se	155	180	307	39	13	10

Quatre niveaux croissant d'intensité moyenne (en terme de mm h⁻¹) ayant 25 % de chance de se produire ont été définis par classe d'événements pluvieux. Ces moyennes sont indiquées au tableau 4.2 pour trois ans (1977, 1978 et 1979). Par manque de données pour les sous-zones, cette répartition est supposée être valable pour toute la zone et pour les deux années de pluviosité, normale et sèche.

Tableau 4.2 Niveaux croissant d'intensité par classe d'événements pluvieux.

Niveau d'intensité	Niveaux croissants (mm h ⁻¹) par classe d' événements pluvieux		
	Pi<10	10<Pi<20	Pi>20
1	3	5	7
2	8	18	34
3	18	37	62
4	32	61	116

Par classe d'événements pluvieux, la quantité totale annuelle de pluie tombée et le nombre de jours de pluie dans une classe d'événements pluvieux, la quantité moyenne de pluie par classe d'événements pluvieux peuvent être dérivés par la formule :

$$PI_c = PM_c / N_c \quad c=1, 2, 3 \quad (4.1)$$

où :

PI_c = quantité de pluie par classe d'événements pluvieux (mm)

PM_c = pluviométrie moyenne annuelle par classe d'événements pluvieux (mm an⁻¹)

N_c = nombre moyen de jours de pluie par an dans une classe d'événements pluvieux

La durée de cette pluie peut être ensuite calculée ainsi que sa quantité (PI_c) et son niveau d'intensité. De cette manière, utilisant la répartition des niveaux d'intensité par classe d'événements pluvieux (tableau 4.2), il est possible de calculer la répartition des durées des événements pluvieux ainsi :

$$\mathbf{DUR}_{i,c} = 60 * \mathbf{PI}_c / \mathbf{INT}_{i,c} \quad c=1, 2, 3 ; i=1,..,4 \quad (4.2)$$

où :

$\mathbf{DUR}_{i,c}$ = durée d'un événement pluvieux par niveau d'intensité et par classe d'événements pluvieux (min)

$\mathbf{INT}_{i,c}$ = intensité d'un événement pluvieux par niveau d'intensité et par classe d'événements pluvieux (mm h-1)

4.1.1.2. L'infiltration maximale par événement pluvieux

Au début d'un événement pluvieux quand le sol est encore sec et le potentiel matriciel du sol encore grand, l'eau est absorbée rapidement par le sol. Un sol mouillé perd son potentiel matriciel et, à un certain moment, il est saturé ; sa force matricielle est alors égale à zéro. L'infiltration ne dépend alors plus que de la force de gravité et de la conductivité hydraulique. La vitesse d'infiltration diminue avec le temps jusqu'à atteindre une valeur constante. L'infiltration maximale par événement pluvieux est déterminée par la formule suivante indiquée par [Penning de Vries & Djitèye \(1981\)](#) :

$$\mathbf{I}_{i,c} = \mathbf{S} * \mathbf{DUR}_{i,c}^{0,5} \quad c=1, 2, 3 ; i=1,..,4 \quad (4.3)$$

où :

$\mathbf{I}_{i,c}$ = infiltration d'un événement pluvieux pendant la durée de la pluie (mm)

\mathbf{S} = capacité d'absorption du sol (mm min^{-0,5})

La capacité d'absorption du sol (ou la sorptivité) est une notion qui tient compte de la force matricielle en fonction de la texture du sol et de l'état de sa surface. Le labour peut temporairement augmenter la sorptivité du sol (Stroosnijder & Hoogmoed, 1984). Il est supposé que la capacité d'absorption du sol est supérieure après préparation du champ qu'à la fin de la saison de croissance. Une distinction est donc faite entre la capacité d'absorption initiale et la capacité d'absorption finale du sol (voir tableau 3.2). Pour tenir compte des différences d'absorption au début et à la fin de la saison de croissance, une capacité d'absorption ajustée a donc été définie :

$$\mathbf{AAC} = \mathbf{PB} / \mathbf{PA} * \mathbf{SI} + (\mathbf{PA} - \mathbf{PB}) / \mathbf{PA} * \mathbf{SF} \quad (4.4)$$

où

\mathbf{AAC} = capacité d'absorption ajustée (mm min^{-0,5})

\mathbf{PB} = précipitations annuelles auxquelles une capacité d'absorption initiale est applicable (mm)

\mathbf{PA} = précipitations annuelles (mm)

\mathbf{SI} = capacité d'absorption initiale (mm min^{-0,5})

\mathbf{SF} = capacité d'absorption finale (mm min^{-0,5})

Les valeurs des capacités d'absorption initiale et finale du sol indiquées aux tableau 3.2 sont utilisées dans les

calculs. Les précipitations annuelles auxquelles la capacité d'absorption initiale est applicable ont été fixées à 200 mm an⁻¹ (Stroosnijder et al., 1991).

La capacité d'absorption ajustée est appliquée dans l'équation (4.3) pour déterminer l'infiltration d'eau d'un événement pluvieux ($I_{i,c}$).

4.1.1.3. La capacité de stockage

L'eau d'un événement pluvieux qui ne peut pas s'infiltrer dans le sol pendant la durée de la pluie ruissellera si elle n'est pas retenue par les inégalités de la surface. La capacité de stockage de l'eau d'un sol dépend donc de la rugosité de ce dernier. Sur des sols non-labourés, la capacité de stockage dépend de la texture ([de Vries & Djitéye, 1981](#)) comme le démontre le tableau 3.2 ; c'est le sol dont le principal composant de la couche supérieure est le sable qui détient la capacité de rétention la plus élevée.

La capacité de rétention peut être améliorée par des mesures de conservation des eaux et des sols, les billons simples et les billons cloisonnés. Ces derniers forment des ados perpendiculaires de sorte à constituer des dépressions qui retiennent l'eau de pluie. Pour les cultures à plat (sans billons), les valeurs du tableau 3.2 sont utilisées. Pour les cultures avec billons simples et cloisonnés, ce sont les valeurs proposées par Stroosnijder & Hoogmoed (1984) qui le sont, c'est-à-dire une capacité de rétention de 10 mm pour les billons simples et de 30 mm pour les billons cloisonnés.

Un diagramme décisionnel expliquant la manière dont sont définies les mesures de conservation des eaux et des sols est présenté à la figure 4.1. Dans la définition des activités, le billonnage cloisonné, par exemple, est seulement appliqué sur les sols sensibles au ruissellement. Si une culture est sensible à l'engorgement et le sol est d'une faible perméabilité (indice de perméabilité de Wischmeier supérieur à 4) un billonnage cloisonné ne sera pas appliqué, mais un billonnage simple. Pour les cultures, une distinction a été faite entre un sol sensible ou non à l'engorgement, en s'appuyant sur une petite recherche bibliographique (Purseglove, 1974 & 1975 ; Doorenbos & Kassam, 1979). Les données retenues sont présentées à [l'annexe IV](#).

[Figure 4.1.](#) Diagramme décisionnel utilisé pour l'évaluation des mesures de conservation des eaux et des sols.

4.1.1.4. Quantité de pluie ruisselée

L'eau infiltrée est égale à l'infiltration maximale par événement pluvieux (calculée selon le [par. 4.1.1.2.](#)) plus la capacité de stockage (voir [par. 4.1.1.3.](#)). Le reste ruisselle. Cette quantité est :

$$R_{i,c} = PI_c - I_{i,c} - CS \quad c=1, 2, 3 ; i=1, \dots, 4 \quad (4.5)$$

où :

$R_{i,c}$ = quantité ruisselée d'un événement pluvieux par classe d'événements pluvieux (mm)

PI_c = quantité de pluie d'un événement pluvieux par classe d'événements pluvieux (mm)

$I_{i,c}$ = infiltration de pluie d'un événement pluvieux pendant la durée de cette pluie (mm)

CS = capacité de stockage (mm)

La quantité minimum de pluie ruisselée par événement pluvieux par classe d'événements pluvieux ($R_{i,c}$) est toujours supérieure à 0 mm.

4.1.1.5. Ruissellement annuel

Le ruissellement calculé comme expliqué ci-dessus, est celui d'un événement pluvieux d'un certain niveau d'intensité pour une certaine classe d'événements pluvieux. Comme chacun des quatre niveaux d'intensité a 25 % de chances de se présenter, le ruissellement d'un événement pluvieux dans une classe d'événements pluvieux est la moyenne de ces quatre niveaux. Les quantités annuelles ruisselées par classe d'événements pluvieux sont calculées comme suit :

$$RA_c = N_c * R_c \quad c=1,2,3 \quad (4.6)$$

où :

RA_c = ruissellement annuel par classe d'événements pluvieux (mm)

N_c = nombre moyen de jours de pluie par an dans une classe d'événements pluvieux

R_c = ruissellement moyen par événement pluvieux dans une classe d'événements pluvieux (mm).

Le ruissellement annuel est calculé comme étant la somme des quantités ruisselées par classe d'événements pluvieux (RA_c). Le tableau 4.3 indique les pourcentages de ruissellement pour les trois sous-zones, les types de sols et les mesures de conservation des eaux et des sols. La différence entre les précipitations annuelles et le ruissellement total correspond à la quantité d'eau qui peut s'infiltrer annuellement dans le sol.

4.1.2. Début et fin de la saison de croissance

Pour déterminer le début et la fin de la saison de croissance, un modèle de simulation de la croissance végétale appliquée au sorgho est utilisé (Erenstein, 1990). La germination commence lorsque 50 % de la capacité d'eau sont atteints dans la couche supérieure du sol (10 cm) pendant deux jours consécutifs. Le modèle a été appliqué pour toutes les combinaisons de données relatives aux sous-zones, aux sols et aux climats décrites au [chapitre 3](#). Les résultats du modèle ont servi à établir la relation existant entre la texture du sol (fraction de sable dans la couche supérieure) et la quantité de précipitations annuelles infiltrée :

Tableau 4.3. Ruissellement, comme pourcentage des précipitations annuelles dans une année de type normal pour trois sous-zones, types de sols et mesures de conservation des eaux et des sols.

Sous-zone :	Substrat :	Mesures de conservation des eaux et des sols		
		à plat	simple	cloison
SZ_12	GR	30	14	0

	LILI	38	18	0
	LISA_f	30	14	0
SZ_21	GR	19	6	0
	LILI	27	12	0
	LISA_f	19	6	0
SZ_37	GR	31	15	0
	LILI	39	17	0
	LISA_f	31	15	0

$$DG = (-0,064 * IR) + (-0,052 * PSC) + (0,00036 * IR * PSC) + B \quad (4.7)$$

Où :

DG = date de germination

IR = précipitations annuelles infiltrées (mm)

PSC = pourcentage de sable dans la couche supérieure

B = constante (= 223 dans les jours de juillet (= 9 août))

Le tableau 4.4 présente les résultats de cette équation. Ils indiquent que, dans les années sèches et pour des types de sols à faible pourcentage de sable dans la couche supérieure (par ex. LILI), la saison de croissance est retardée.

Tableau 4.4. Début et fin de la saison de croissance pendant une année sèche et normale pour une culture de sorgho, dans les trois sous-zones et sur trois différents types de sols, en prenant des mesures de conservation des eaux et des sols (billons cloisonnés).

		Début de la saison de croissance		Fin de la saison de croissance	
Sous-zone :	Substrat :	Année normale	Année sèche	Année normale	Année sèche
SZ_12	GR	juin 14	juin 21	octobre 16	octobre 5
	LILI	juin 20	juin 29	octobre 30	octobre 6
	LISA_f	juin 13	juin 20	octobre 22	octobre 7
SZ_21	GR	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
	LILI	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
	LISA_f	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
SZ_37	GR	juin 4	juin 12	octobre 28	octobre 18
	LILI	juin 8	juin 18	novembre 27	novembre 4
	LISA_f	juin 3	juin 11	novembre 8	octobre 25

n.p. = Combinaison impossible. La durée potentielle de la saison de croissance est plus courte que la durée minimum requise.

Le même modèle de simulation de la croissance végétale est appliqué à la fin de la saison de croissance. La fin de cette saison ainsi dérivée peut être décrite par une fonction des précipitations annuelles infiltrée, la profondeur effective d'enracinement et la fraction de sable dans la couche supérieure du sol :

$$\text{EGR} = (-3,39\text{E-}5 * \text{IR}^2) + (7,64\text{E-}2 * \text{IR}) + (-5,23\text{E-}2 * \text{FSS}) + (-0,344 * \text{PR}) + (8,21\text{E-}4 * \text{IR} * \text{PR}) + (4,01\text{E-}3 * \text{FSS} * \text{PR}) + -8,25\text{E-}6 * \text{IR} * \text{FSS} * \text{PR} + \text{C} \quad (4.8)$$

Où :

EGR = fin de la saison de croissance

FSS = fraction de sable dans la couche supérieure du sol

PR = profondeur maximale effective (m)

C = constante (254 dans les jours de juillet (= 9 septembre))

La profondeur maximale effective (PR dans la formule 4.8) correspond au minimum des profondeurs de sol et d'enracinement effectif. [L'annexe IV](#) présente les valeurs spécifiques des profondeurs d'enracinement. Les profondeurs de sol sont indiquées au tableau 3.2.

Les résultats de cette équation figurent au tableau 4.4. Pendant les années sèches, la fin de la saison de croissance est avancée. Sur les sols dont la couche supérieure contient une fraction de sable relativement faible (et dont la capacité de rétention d'eau est par conséquent plus élevée), la fin de la saison de croissance est plus tardive.

Une fois connus le début et la fin de la saison de croissance, il est possible de déterminer sa durée potentielle. Celle-ci dépend des cycles minimum et maximum des cultures spécifiques, c'est-à-dire du nombre minimum et maximum de jours requis pour que la culture arrive à maturité. Ces durées potentielles minimum et maximum sont indiquées à [l'annexe IV](#) pour les cycles de croissance spécifiques des cultures. Trois situations sont distinguées : (i) la durée potentielle de la saison de croissance est plus courte que le cycle minimum de croissance spécifique de la culture, (ii) cette durée est plus longue que le cycle maximum de croissance, ou (iii) la durée potentielle est plus longue que le cycle minimum mais plus courte que le cycle maximum de croissance spécifique. Dans la situation (i) la récolte échouera parce que la saison de croissance est trop courte pour permettre à la culture d'arriver à maturité. Ces situations sont indiquées sur le tableau 4.4 par « n.p. ». Dans la situation (ii) le cycle maximum de croissance de la culture est appliqué et dans la situation (iii) la durée potentielle de la saison de croissance.

4.1.3. L'eau disponible pour la croissance

L'eau infiltrée potentiellement disponible pour la croissance est considérée comme étant la quantité d'eau infiltrée pendant la croissance de la culture. Une partie de l'eau infiltrée est perdue par percolation, une autre partie par l'évaporation.

La percolation a été estimée par une formule donnée dans [Breman & De Ridder \(1991\)](#) :

$$\text{PER} = 0,69 * \text{IR} - 45 * \text{H} - 22 * \text{PR} - 7,8 * (\text{H} * \text{PR}) - 74 \quad (4.9)$$

où :

PER = percolation (mm an⁻¹)

H = teneur en eau à la capacité au champs (m m⁻¹)

PR = profondeur maximale effective (= profondeur en dessous laquelle l'eau percole) (m).

La profondeur en dessous laquelle l'eau percole est considérée comme étant le minimum des profondeurs du sol et d'enracinement effectif. Les teneurs en eau à la capacité au champ pour les différents substrats sont présentées au tableau 3.2. Quelques résultats de cette équation sont donnés au tableau 4.5, pour le sorgho, pour les trois sous-zones et pour trois types de sols.

Tableau 4.5. Infiltration de pluie, teneur en eau à la capacité au champ, profondeur maximale et percolation pour une culture de sorgho dans les trois sous-zones et pour trois types de sols.

Sous-zone	Substrat	Infiltration pendant la période de croissance (mm an ⁻¹)	Teneur en eau à la capacité au champ (mm ⁻¹)	Profondeur maximale (m)	Percolation (mm an ⁻¹)
SZ_12	GR	605	138	0,46	327
	LILI	605	461	1,25	295
	LISA_f	605	231	1,25	305
SZ_22	GR	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
	LILI	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
	LISA_f	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
SZ_37	GR	840	138	0,46	489
	LILI	840	461	1,25	457
	LISA_f	840	231	1,25	468

n.p. = combinaison non possible. La durée potentielle de la saison de croissance est plus courte que la durée minimum requise.

L'évaporation est estimée sur la base de l'évapotranspiration potentielle, en fonction de la couverture végétale pendant la saison de croissance et la durée de cette saison :

$$EVA = (ETP * FLAI + ETP * (1 - FLAI) * 0,5 * NJLAI) / DUR \quad (4.10)$$

Où :

EVA = eau évaporée (mm an⁻¹).

ETP = évapotranspiration potentielle (mm)

FLAI = fraction de l'ETP évaporée à un indice de superficie foliaire (LAI) de 5 (= fermeture totale du feuillage)

NJLAI = nombre de jours après germination pour obtenir un LAI de 5

$DUR = \text{durée de la période de croissance (jours)}$

Les valeurs spécifiques des cultures pour les paramètres FLAI et NJLAI utilisés dans la formule (4.10) sont indiquées à [l'annexe IV](#).

L'eau disponible pour la croissance est calculée par l'équation :

$$EAU_CR = IR - PERC - EVA \quad (4.11)$$

où :

$EAU_CR = \text{eau pour la croissance (mm an}^{-1}\text{)}$

4.1.4. La production de biomasse cible

La production de biomasse des cultures pluviales est 80 % de la production limitée par l'eau, calculée selon la méthode développée par Tanner & Sinclair (1983) :

$$BM = k * EAU_CR * 10\ 000/DPV * RWU * RD * DSF \quad (4.12)$$

Où :

$BM = \text{biomasse (kg)}$

$k = \text{constante (kPa)}$

$DPV = \text{déficit de pression de vapeur (mbar)}$

$RWU = \text{facteur de réduction pour tenir compte d'une utilisation d'eau non-optimale}$

$RD = \text{facteur de réduction pour tenir compte des maladies et des attaques parasitaires}$

$DSF = \text{facteur de sensibilité à la sécheresse}$

La constante k est également déterminée selon Tanner & Sinclair (1983) de la manière suivante :

$$k = (0,68 * b * c / 1,5) * 0,8 * (1,4 / 2,2) / 10 \quad (4.13)$$

où b et c sont des coefficients cultureux spécifiques présentés à [l'annexe IV](#).

Trois variables ont été ajoutées à la formule originelle de Tanner & Sinclair : (i) le facteur de réduction pour une utilisation d'eau non-optimale (RWU) qui tient compte de la variabilité locale des apports hydriques au début et à la fin de la saison de croissance ; sa valeur a été fixée à 0,8 ; (ii) le facteur de réduction pour les maladies et les attaques parasitaires (RD) a été ajouté pour tenir compte des inévitables réductions de rendement dans ces cas ; il est supposé que 20 % du rendement de biomasse est perdu du fait de maladies ou de parasites ; (iii) le facteur de sensibilité à la sécheresse (DSF) est une valeur seuil exprimée comme le rapport entre l'évapotranspiration réelle et potentielle. La première est l'addition de l'évaporation (EVA) déterminée par la formule (4.10) et de l'eau disponible pour la croissance végétale (EAU_CR) déterminée par la formule (4.11) et qui a été transpirée. La seconde (ETP) est l'addition des valeurs relevées pendant la décennie, pendant la saison de croissance (voir [section 3.2](#)). Lorsque cette valeur tombe en dessous du seuil spécifique à la culture, le rendement décline

linéairement à zéro vu le stress croissant lié à la pénurie d'eau. Au-dessus de ce seuil, le rendement ne souffre pas. Pour les cultures plus sensibles à la sécheresse, la valeur à laquelle les rendements sont réduits est plus élevée que celle relevée pour les cultures moins sensibles à la sécheresse. Par exemple, pour le mil qui est la culture la plus xérophyte, cette valeur a été fixée à 0,25, pour le sorgho et l'arachide à 0,35, pour le maïs, le coton et le niébé à 0,5. Pour les coefficients de sensibilité à la sécheresse d'autres cultures spécifiques, voir [l'annexe IV](#).

Pour les cultures sur les sols EC sensibles à l'engorgement, une réduction de rendement additionnelle de 25 % est prise en compte, étant donné le risque encouru au moment de la récolte.

La production de biomasse cible (aérienne et souterraine) des cultures pluviales est présentée au tableau 4.6, pour trois sous-zones et trois types de sols.

Concernant les cultures inondées, une approche différente a été choisie parce que l'eau n'est généralement pas le facteur le plus limitant de la production végétale. La production de riz irrigué par gravité ou à la pompe, est basée sur la production potentielle gérée par la radiation. La production potentielle moyenne journalière de biomasse dépend du type de culture et varie entre 185 kg ha⁻¹ et 300 kg ha⁻¹ pour une couverture fermée. Voir [l'annexe IV](#) pour les valeurs applicables aux cultures. La production potentielle annuelle de biomasse est déterminée en multipliant ces valeurs par la durée de la période de croissance, moins 15 jours pour tenir compte de la période pendant laquelle la couverture végétale n'est pas encore totale. Les facteurs de réduction pour une utilisation hydrique non-optimale et les maladies et parasites (voir plus haut) sont également appliqués pour estimer la biomasse finale atteignable pour le riz irrigué par gravité ou à la pompe.

Pour les autres cultures inondées, les rendements de la biomasse sont basés sur les valeurs dérivées de la littérature, multipliées par un facteur de correction pour tenir compte de la période d'inondation. Pour le sorgho de décrue, ce facteur se base sur la fraction inondée en crue maximale.

4.2. La biomasse cible aux quatre niveaux de production

La section précédente (4.1) a décrit les méthodes qui ont été appliquées pour déterminer les limites supérieures de la production de biomasse végétale. Les niveaux déterminés sont relativement élevés comparés aux rendements des cultures de la région soudano-sahélienne. Ces niveaux élevés ne peuvent être maintenus sur le long terme que par des apports extérieurs également élevés (de nutriments, par exemple). Pour schématiser l'objectif principal des options d'utilisation des terres pour l'agriculture avec le modèle PLBM développé par l'EMS (Bakker *et al.*, 1996b), des niveaux de rendement inférieurs peuvent s'avérer intéressants parce qu'ils requièrent un niveau d'intrant plus bas pour être maintenus. C'est ainsi que quatre niveaux de production ont été définis qui ne diffèrent pas seulement par leur rendement, mais aussi par les exigences de main d'oeuvre, l'usage de la traction animale, les caractéristiques culturales et l'efficacité des éléments nutritifs. Il est supposé que, pour des niveaux de production plus élevés, des techniques plus sophistiquées, c'est-à-dire la traction animale ou la mécanisation (voir [section 5.3](#)) et des cultures dotées de caractéristiques de rendement plus élevées sont utilisées (voir la [section 5.2](#)).

Par culture, on a défini quatre niveaux cibles de production : **extensif**, **semi-extensif**, **semi-intensif** et **intensif**, avec, par ordre croissant, une production de biomasse supérieure, un usage accru de la traction animale, une efficacité d'utilisation des nutriments plus élevée et des cultures à caractéristiques de rendement plus importantes. Par exemple, un niveau moindre de production est attribué au coton et aux cultures inondées. Les niveaux de production définis, pour chaque culture, sont présentés à [l'annexe IV](#).

Tableau 4.6. Production maximale de biomasse cible (aérienne et souterraine) dans trois sous-zones, pour trois types de sol, pendant des années normales, et en prenant des mesures de conservation des eaux et des sols

Sous-zone	Sol	Culture									
		Mil	Sorgho	Maïs	Niébé	Arachide	Andropogon	Andropogon repousse	Stylosanthus	Niébé fourrager	Coton
SZ_12	GR	6 108	6 108	5 855	2 116	1 981	6 534	645	2 848	2 848	n.p.
	LILI	9 543	12 258	9 366	3 274	2 924	14 001	1 357	4 685	4 407	n.p.
	LISA_f	11 190	10 149	9 080	2 891	2 596	14 059	1 369	5 790	3 891	3 639
SZ_21	GR	4 106	n.p.	n.p.	1 216	1 306	4 119	421	1 636	1 636	n.p.
	LILI	6 100	n.p.	n.p.	2 201	1 946	n.p.	n.p.	2 892	n.p.	n.p.
	LISA_f	6 276	n.p.	n.p.	2 038	1 812	8 041	816	3 110	2 744	n.p.
SZ_37	GR	10 213	10 294	10 294	3 701	3 331	12 342	1 194	5 034	4 982	3 164
	LILI	16 353	18 081	17 356	5 667	5 101	24 495	2 671	9 327	7 629	5 862
	LISA_f	16 030	16 044	14 438	4 568	4 111	23 800	2 266	9 319	6 149	5 857

n.p. = combinaison impossible. La durée potentielle de la saison de croissance est plus courte que la durée minimum requise.

Pour les quatre niveaux de production, la biomasse cible est définie selon les critères suivants :

Biomasse cible de la production intensive

La biomasse cible au niveau de production intensif est égale à la biomasse calculée au [paragraphe 4.1](#) : pour les cultures pluviales, la biomasse constitue 80 % de la production limitée par l'eau, corrigée pour les pertes inévitables (maladies, parasites, engorgement des sols EC).

Biomasse cible de la production semi-intensive

La biomasse cible au niveau de production semi-intensif est la moyenne des biomasses des niveaux intensif et semi-extensif (voir point suivant).

Biomasse cible de la production semi-extensive

La biomasse cible du niveau de production semi-extensif est basée sur [Penning de Vries & Djitèye \(1982\)](#) et dérive d'une simple relation linéaire entre la production de biomasse et l'eau de pluie infiltrée : l'eau de pluie infiltrée, corrigée pour tenir compte du ruissellement et des retenues d'eau écoulées (voir [section 4.1](#)), est multipliée par les facteurs spécifiques des cultures présentés à [l'annexe IV](#).

Biomasse cible de la production extensive

La biomasse cible de ce niveau de production est calculée de la même manière que celle du niveau de production semi-extensif. Elle est cependant de 20 % inférieure parce qu'on suppose que l'usage de la traction animale au niveau de production semi-extensif permet d'accroître le niveau de rendement (Van Duivenbooden *et al.*, 1991).

La production de biomasse de 10 cultures pluviales pendant une année pluvieuse normale, pour le type de sol LILI dans les trois sous-zones est illustrée au tableau 4.7.

A noter que pour SZ_21 aucune activité culturale n'est possible pour les critères de définition appliqués.

Tableau 4.7. Production de biomasse végétale de cultures pluviales sur des sols LILI, aux quatre niveaux de production, dans les trois sous-zones (coton sur les sols LIAR). Aucune mesure de conservation des eaux et des sols ne sont prises.

Culture	Sous-zone	Niveau de production			
		extensif	semi-extensif	semi-intensif	intensif
Millet	SZ_12	1 875	2 250	4 072	5 893
	SZ_21	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
	SZ_37	2 581	3 098	7 730	12 362
Sorgho	SZ_12	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
	SZ_21	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
	SZ_37	2 581	3 098	7 649	12 200
Maïs	SZ_12	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
	SZ_21	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
	SZ_37	2 581	3 098	7 564	12 031
Niébé	SZ_12	1 125	1 350	1 750	2 149
	SZ_21	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
	SZ_37	1 549	1 859	3 063	4 267
Arachide	SZ_12	1 125	1 350	1 750	2 149
	SZ_21	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
	SZ_37	1 549	1 859	3 063	4 267

Andropogon	SZ_12	n.d.	n.d.	n.p.	n.p.
	SZ_21	n.d.	n.d.	n.p.	n.p.
	SZ_37	n.d.	n.d.	8 896	14 694
Andropogon repousse	SZ_12	n.d.	n.d.	n.p.	n.p.
	SZ_21	n.d.	n.d.	n.p.	n.p.
	SZ_37	n.d.	n.d.	2 276	1 454
Stylosanthus	SZ_12	n.d.	n.d.	2 076	2 784
	SZ_21	n.d.	n.d.	n.p.	n.p.
	SZ_37	n.d.	n.d.	3 973	6 087
Niébé fourrager	SZ_12	n.d.	n.d.	n.p.	n.p.
	SZ_21	n.d.	n.d.	n.p.	n.p.
	SZ_37	n.d.	n.d.	3 801	5 744
Coton	SZ_12	n.d.	n.d.	n.p.	n.p.
	SZ_21	n.d.	n.d.	n.p.	n.p.
	SZ_37	n.d.	n.d.	3 315	4 550

n.p. = combinaison impossible. La durée potentielle de la saison de croissance est plus courte que la durée minimum requise.

n.d. = niveau de production non défini.

4.3. Production de biomasse cible par rapport aux rendements cibles

La biomasse d'une culture est divisée en 5 parties - grains, infructescences, feuilles, tiges et racines - selon quatre caractéristiques spécifiques :

- le coefficient de production aérienne/souterraine (RAS)
- le coefficient de production infructescences/aérienne (RIA)
- le coefficient production grains/infructescences (RGI)
- le coefficient de production feuille/paille (RFP)

Pour déterminer la répartition de la biomasse entre les quatre éléments, les formules suivantes sont appliquées :

$$\text{Rendement grain} = \text{RGI} * (\text{RIA} * \text{RAS} / (\text{RAS} + 1)) * \text{BM} \quad (4.14)$$

$$\text{Rendement infructescences} = (1 - \text{RGI}) * (\text{RIA} * \text{RAS} / (\text{RAS} + 1)) * \text{BM} \quad (4.15)$$

$$\text{Rendement feuille} = (\text{RFP} * (1 - \text{RIA})) * (\text{RAS} / (\text{RAS} + 1)) * \text{BM} \quad (4.16)$$

$$\text{Rendement tige} = (1 - \text{RFP}) * (1 - \text{RIA}) * (\text{RAS} / (\text{RAS} + 1)) * \text{BM} \quad (4.17)$$

$$\text{Rendement racine} = 1/(\text{RAS}) * \text{BM} \quad (4.18)$$

Où BM représente la biomasse totale produite (en kg ha⁻¹) comme estimé à la section 4.2. Il est supposé qu'à des niveaux de production intensive plus élevés (voir [section 4.2](#)), des espèces végétales dotées de meilleures caractéristiques de rendements en grains sont utilisées. Ceci se reflète dans les coefficients de répartition spécifique des cultures aux différents niveaux de production. Les caractéristiques végétales spécifiques pour RAS, RIA et RGI augmentent avec l'intensification des productions ([voir annexe IV](#)). Le tableau 4.8 illustre la répartition de la biomasse pour les cultures pluviales.

Tableau 4.8. Répartition de la biomasse entre les différentes parties des cultures pour les cultures pluviales en zone SZ_37, pendant une année de précipitations normale, à un niveau de production intensif et sans mesures de conservation des eaux et sur des sols de type LILI (coton sur LISA_f).

Culture	Racine	Tige	Feuille	Infructescences	Grains
Millet	1766	3444	1854	2119	3179
Sorgho	1743	3399	1830	1307	3922
Maïs	1719	2552	2088	567	5105
Niébé	610	805	1207	247	1399
Arachide	545	490	1144	409	1226
Andropogon	1633	7837	5224	0	0
Andropogon repousse	162	776	517	0	0
Stylosanthus	1353	1160	3480	19	76
Niébé fourrager	821	1206	3619	20	79
Coton	414	1075	1613	507	941

[Chapitre 5, 6 et 7, bibliographie et annexes](#)

Rapports PSS N° 28 (Chapitre 5, 6 et 7)

Description agronomique quantitative des systèmes de production végétale en zone soudano-sahélienne

[Table des matières,](#)
[Chapitre 1, 2, 3 et 4](#)

5. Les intrants des cultures

Ce chapitre décrit les intrants apportés aux activités culturelles. Ils sont divisés en cinq composants principaux : la matière organique, les nutriments, la main d'oeuvre, les boeufs de labour et le capital.

5.1. La matière organique

Dans la définition des activités culturelles, il est tenu compte de la durabilité agro-écologique, supposant que ces activités peuvent être maintenues sur le long terme sans entraîner une dégradation de la teneur en matière organique et des nutriments du sol. Les teneurs cibles en matière organique sont définies (voir [paragraphe 3.1.2](#)) de sorte à préserver des niveaux de productivité durables. En conséquence, ces teneurs en matière organique du sol doivent être maintenues par addition annuelle de matière organique au sol pour compenser le processus permanent de décomposition auquel cette dernière est soumise. Ce réapprovisionnement annuel des réserves du sol est défini comme étant un intrant des activités culturelles.

Les teneurs cibles en matière organique du sol décrites au [paragraphe 3.1.2](#) sont ajustées pour tenir compte de deux phénomènes :

a. Il est assumé qu'aux niveaux de productions les plus intensifs, la qualité de la matière organique est plus élevée, en termes de teneur en nutriments, et par conséquent plus susceptible de se décomposer, c'est-à-dire : il faut plus de matière organique pour maintenir la teneur cible en matière organique du sol parce que le taux de décomposition de la matière organique au niveau le plus intensif de production est plus élevé. Il s'ensuit que les teneurs cibles en matière organique sont relevées de
25 % pour les niveaux de production intensive
15 % pour les niveaux de production semi-intensive, et de
0 % pour les niveaux de production (semi-)extensive.

b. L'érosion du sol décrit à la [section 6.3](#) réduit les réserves disponibles en matière organique dans la couche supérieure du sol. Pour en tenir compte, la teneur cible en matière organique est divisée par un

facteur d'érosion (EF) calculé comme suit :

$$EF = e (1640 * FP2 - 63 * FP) \quad (5.1)$$

où : FP = érosion du sol comme fraction de poids de la couche supérieure du sol.

Vu que la qualité de la matière organique diffère en fonction des sources et de la capacité de maintien des teneurs dans le sol, les différentes sources de matière organique sont exprimées comme Matière Organique Standard (MOST). Une unité de MOST (UMO) est définie comme étant la quantité de matière organique d'une qualité donnée capable de maintenir 1 % de matière organique dans les premiers 20 cm d'un sol argileux sur un hectare pendant une journée d'activités microbiennes optimales. Trois variables sont nécessaires pour calculer l'apport annuel requis de MOST d'une activité culturale (en termes d'UMO par ha) pour maintenir la teneur en matière organique du sol :

1. La teneur cible en matière organique du sol qui doit être maintenue (y compris les facteurs de correction ci-dessus mentionnés).
2. Le nombre de jours d'activité microbienne optimale qui, pour les cultures pluviales, correspond à une fraction (0,4) de la durée de la saison de croissance (voir [paragraphe 4.1.2](#)) et, pour les cultures inondées à la durée de la période de submersion fois 0,1.
3. La texture du sol en termes de facteur de protection. La matière organique fraîche est protégée contre la décomposition par liaison des particules d'argiles (Verberne *et al.* , 1990). Plus la teneur en argile d'un sol est élevée, plus il faut de matière organique fraîche pour maintenir la teneur visée. Par rapport à un sol argileux, les besoins en MOST d'un sol sableux est de 1,6 fois plus élevé.

Pour les sols argileux d'une teneur en argile de 50 %, le facteur de protection a été fixé à 0,7. Il est de 0,3 pour des sols sableux comprenant un minimum de 2,5 % d'argile dans la couche supérieure. Les facteurs de protection des autres sols est déterminé par interpolation linéaire. Ces facteurs de protection sont ensuite traduits en un facteur d'inflation indiquant les besoins additionnels de matière organique (IF). Ce facteur d'inflation est de 1,6 pour un facteur minimum de protection de 0,3 pour les sols sableux et de 1 pour un facteur maximum de protection de 0,7 pour les sols argileux. Le facteur d'inflation correspondant aux autres facteurs de protection est déterminé par interpolation linéaire.

L'intrant MOST (MI) est calculé comme suit :

$$MI = MO * DG * IF \quad (5.2)$$

Où :

MI = intrant MOST (UMO ha⁻¹)

MO = teneur corrigée de matière organique du sol (%)

DG = nombre de jours d'activité microbienne optimale (jours)

IF = facteur d'inflation

Par exemple, pour maintenir un taux de 1,5 % de matière organique dans le sol argileux d'une zone connaissant une saison des pluies de 120 jours, il faut un apport annuel de $1,5 * 120 * 0,4 = 72$ UMO ha⁻¹.

Pour satisfaire aux besoins en MOST des activités culturales, plusieurs sources distinctes sont disponibles, chacune présentant des taux de décomposition différents et par conséquent, des capacités divergentes à maintenir la matière organique du sol. Ces sources sont donc transformées en MOST (voir aussi [chapitre 7](#)). La valeur MOST de la matière organique (en termes d'UMO) dépend de sa décomposition. Trois fractions ont été identifiées : matériau facilement décomposable (DPM), matériau de structure (SPM) et matériau résistant (RPM).

Une relation entre la composition du matériau organique et la quantité de matière organique nécessaire pour donner 1 UMO est dérivée d'un modèle de simulation dynamique de la matière organique du sol (Verberne *et al.*, 1990). Ce modèle fonctionne par étapes horaires quotidiennes. Une procédure itérative permet de déterminer la quantité de matière organique requise tous les ans pour maintenir la teneur en matière organique du sol pendant une durée donnée de la saison de croissance. Le maintien de la teneur en matière organique implique que la quantité et la qualité de cette matière sont identiques au début et à la fin de la saison de croissance. Il est supposé que la température et l'humidité du sol sont telles qu'elles permettent aux processus de s'enclencher pour donner des taux maximums pendant la saison de croissance, tandis que ces processus stagnent pendant la saison sèche. Pour ce modèle, les paramètres d'entrée sont la qualité de la matière organique exprimée en matériau facilement décomposable (DPM), matériau de structure (SPM) et matériau résistant (RPM), le facteur de protection étant fixé à 0,7. Les résultats du modèle dynamique de simulation sont utilisés pour dériver une équation de régression qui permet d'estimer l'intrant en C annuellement requis pour le matériau organique (en kg ha⁻¹) en vue d'obtenir 1 kg de MOST :

$$\text{CIN} = a + b * \text{RPM} + c * \text{DPM} + d * \text{RPM} * \text{DPM} + e * \text{RPM} * \text{SPM} + f * \text{DPM} * \text{SPM} + \text{PR} * (g + h * \text{RPM} + i * \text{DPM} + j * \text{RPM} * \text{DPM} + k * \text{RPM} * \text{SPM} + l * \text{DPM} * \text{SPM}) \quad (5.3)$$

Où :

CIN = apport en C annuellement requis (kg C) pour obtenir 1 kg de MOST

PR = facteur de protection

DPM = pourcentage de matériau décomposable

RPM = pourcentage de matériau résistant

SPM = pourcentage de matériau de structure

a - l = coefficients de régression

Les valeurs des coefficients de régression sont :

a = 39,29, b = -34,54, c = -16,16, d = -22,06, e = -33,76, f = 19,77, g = -32,08, h = 30,68, i = 15,15, j = 22,59, k = 39,02, l = -18,90.

Les coefficients de régression reflètent les taux de décomposition des trois composants de la matière organique et des pools de matière organique du sol. Les paramètres appliqués sont basés sur les estimations de Verberne (1992).

La décomposition végétale, en termes de DPM, SPM et RPM, diffère entre les cultures et au sein des cultures, c'est-à-dire, selon les différentes parties d'une même culture. La distinction faite entre les parties des cultures est présentée à [l'annexe IV](#).

Les valeurs MOST des différentes sources de matière organique sont présentées au tableau 5.1.

Considérant l'exemple ci-dessus quant à la quantité de MOST requise pour maintenir la teneur en matière organique d'un sol argileux (72 UMO ha^{-1}), il est possible de déterminer la quantité de matière organique fraîche en divisant les besoins en MOST par les valeurs du tableau 5.1. Ainsi, pour le mil, on obtient 1800 kg de résidus de récolte de mil par ha ($= 72/0,0397$). L'emploi du seul fumier ne demande que 1224 kg ha^{-1} ($= 72/0,0588$).

Tableau 5.1. Valeurs MOST des différentes sources de matière organique, exprimées en termes de UMO kg^{-1} .

Source de matière organique	MOST (UMO kg^{-1})
Andropogon	0,0387
Andropogon repousse	0,0371
Bourgou	0,0378
Arachide	0,0423
Coton	0,0445
Maïs	0,0383
Mil	0,0397
Niébé	0,0410
Niébé fourrager	0,0410
Riz irrigué par gravité	0,0378
Riz irrigué à la pompe	0,0378
Riz : submersion contrôlée	0,0378
Riz : submersion non contrôlée	0,0378
Sorgho	0,0381
Sorgho de décrue	0,0381

Fumier

0,0588

L'apport de MOST peut être assuré par cinq produits intermédiaires (voir aussi la [section 2.2](#)) : paillage avec les résidus, enfouissement des résidus, fumier, jachère et litière. On suppose que les racines restent toujours dans le champs et constituent donc un apport direct de MOST à l'activité culturale, c'est-à-dire qu'il n'est pas tenu compte de leur contribution aux réserves de matière organique du sol dans la formule 5.2. La différence de matière organique entre la teneur cible corrigée et la teneur obtenue avec les racines, doit être apportée par les produits intermédiaires. Dans les matrices d'intrants/extrants, cette quantité est définie comme des apports nécessaires. Dans le modèle de PLBM, l'apport (de produits intermédiaires) et les besoins sont en équilibre.

5.2. Nutriments

La dynamique de la matière organique analysée dans la section précédente, est étroitement liée au problème plus exhaustif de la gestion des nutriments du sol. Pour surveiller l'état des nutriments pour les activités culturales, on établit des bilans qui permettent de comparer les apports et les pertes de nutriments dans un système (Smaling, 1993). Les processus d'apport et de perte pris en compte sont présentés au tableau 5.2.

Une activité culturale est considérée comme durable, en termes de réserve de nutriments, si les apports et les pertes de N, P et K se trouvent en situation d'équilibre.

Tableau 5.2. Processus d'apports et de pertes utilisés pour calculer les bilans d'éléments nutritifs pour les activités culturales.

Apports

Epannage de fumier
Epannage d'engrais inorganiques
Application de résidus de récolte
Dépôts humides et secs
Fixation biologique
Décomposition

Pertes

Récolte des produits cultivés
Retrait des résidus des récoltes
Dénitrification
Volatilisation
Lessivage
Erosion

Les deux paragraphes suivants traitent des processus d'apport et de perte de N, P et K. A la fin du [paragraphe 5.2.2](#), un exemple de procédure de calcul des besoins en azote est présenté. La même procédure est applicable au K. En ce qui concerne le P qui est un nutriment immobile et par conséquent non sujet à perte, une approche légèrement différente est appliquée. Il s'agit d'un simple modèle

d'équilibre décrit à la [section 5.2.3](#).

5.2.1. Processus de pertes

Export de nutriments par les extrants de l'activité

La quantité de nutriments retirée du champ avec le produit principale de la récolte et les résidus est fonction du rendement (voir [chapitre 4](#)), de la concentration de nutriments dans les différentes parties de la culture et de la stratégie d'exploitation des résidus de récolte ([chapitre 2](#) et [chapitre 7](#)). Les concentrations d'éléments nutritifs dans les différentes parties de la culture sont basées sur les concentrations minimums indiquées par Van Duivenbooden (1992) multipliées par le facteur de correction correspondant au niveau de production, en tenant compte du fait que les nutriments ne sont presque jamais dilués à des concentrations minimum étant donné l'effet négatif sur les autres facteurs de réduction de la croissance de ces faibles concentrations. Les concentrations minimums et leurs facteurs de multiplication sont présentés à [l'annexe IV](#). Pour les cultures fixant l'azote, on suppose que 75 % de l'azote absorbé par la culture est fourni par Rhizobia, la bactérie fixatrice de l'azote.

Volatilisation et dénitrification

Les pertes par volatilisation et dénitrification sont estimées à 30 % de l'azote appliqué. Les deux processus sont encore mal connus et une quantification plus précise est donc difficilement réalisable.

Lessivage

Les nutriments N et K peuvent être lessivés par percolation en dessous de la zone d'enracinement. L'azote et le potassium inorganiques ainsi perdus, sont une fraction de la fraction d'eau percolée. Le taux d'azote perdu par lessivage a été fixé à 70 % du rapport d'eau percolée et d'eau totale infiltrée. La quantité d'eau percolée est calculée à l'aide de l'équation (4.9).

Pour le potassium, la fraction perdue par percolation de l'eau dépend de la teneur en argile du sol. Plus la teneur en argile est élevée, moins grandes sont les pertes de K. Le taux minimum de potassium perdu dans l'eau percolée a été fixé à 25 % pour un sol composé d'argile à 50 %. Le pourcentage maximum perdu est de 90 % pour les sols d'une teneur en argile de 2,5 %. Les fractions de pertes de K pour les sols ayant d'autres teneurs en argile sont déterminées par interpolation linéaire.

Fixation du K

La fixation du potassium est considérée comme un processus additionnel de perte. On suppose que ce processus est irréversible et que le K fixé par les particules du sol n'est plus disponible pour la culture. La quantité de K fixée dépend de la teneur en argile du sol : plus la teneur est élevée, plus le potassium est fixé. Le pourcentage minimum de potassium a été fixé à 10 % pour les sols d'une teneur en argile de 2,5 %. Les pertes de K dans les autres sols de teneurs en argile différentes sont déterminées par interpolation

linéaire.

L'érosion

La procédure d'estimation de l'érosion du sol à l'aide de l'équation universelle de perte de sol, USLE (Universal Soil Loss Equation) est décrite à la [section 6.3](#). Il suffit ici de noter qu'il est tenu compte des pertes d'éléments nutritifs dues à l'érosion en multipliant la perte de sol et la concentration de nutriments dans le sol. Voir le tableau 3.2 pour les concentrations de P et K du sol. La teneur en azote du sol est basée sur la teneur cible corrigée de matière organique (voir [section 5.1](#)) et le rapport C/N de matière organique qui a été fixé à 15. Les pertes de P et K augmentent avec un facteur d'enrichissement de 1,25, tenant compte du fait que les teneurs en nutriments sont généralement plus élevées dans le sédiment de la couche supérieure que dans le reste du sol, dû à la présence d'une proportion plus élevée de matière organique et de particules fines. Ce facteur d'enrichissement n'est pas appliqué à l'azote parce qu'il est déjà tenu compte de l'érosion dans la teneur cible corrigée de matière organique. La teneur en matière organique s'en trouve de ce fait accrue.

Effet du niveau de production et de la source de nutriments

Les pertes d'azote et de potassium par dénitrification, volatilisation et lessivage (et pour le potassium, également par fixation), sont additionnés. En fonction du niveau de production, elles s'élèvent à : 25 % pour le niveau de production (semi-)extensif, 10 % pour le niveau de production semi-intensif, et 10 % pour le niveau de production intensif, de sorte à tenir compte des conditions les moins favorables aux niveaux de production les plus extensifs. On suppose ainsi que les pertes de nutriments se produisent parce que les conditions d'environnement ne sont pas optimales.

On suppose de plus que les pertes d'azote du matériau organique (fixation microbienne, fumier et résidus de récolte) dues à la volatilisation, à la dénitrification et au lessivage, sont supérieures de 40 % à celles des engrais (inorganiques) parce qu'une partie de l'azote de la matière organique se minéralise hors de la saison de croissance. Les engrais inorganiques peuvent être appliqués plus régulièrement pendant la saison de croissance à des moments où la culture a besoin de nutriments. L'azote d'origine inorganique est absorbé par la récolte avant de se perdre. Il est par conséquent moins sensible à la volatilisation, au lessivage et à la dénitrification.

5.2.2. Processus d'apport

Dépôts humides et secs

Les nutriments N, P et K apportés par la pluie et le vent sont estimés à 0,0065, 0,0007 et 0,005 kg ha⁻¹ par mm de pluie (Van Duivenbooden, 1992). Pour les sols submergés, on suppose un apport additionnel de 8 kg N ha⁻¹ an⁻¹ par la crue.

Fixation de l'azote par des micro-organismes (libres et associés)

L'apport d'azote par des bactéries fixatrices d'azote associées est estimé à 0,2 g par kg de matière sèche (aérienne). La fixation d'azote par les bactéries vivant librement dans le sol et associées à la matière organique incorporée dans le sol a été fixée à 0,25 g par kg de matière organique du sol ([Penning de Vries & Djitéye, 1982](#)). La quantité de matière organique du sol est basée sur la composition des résidus abandonnés dans les champs après la récolte. En combinant les formules (5.2) et (5.3), il est possible de quantifier la quantité de matière organique se trouvant dans la couche supérieure du sol. La teneur en C de la matière organique est estimée à 58 % et la variable « IF » dans la formule (5.2) est 1.

Altération des minéraux

La décomposition du potassium et du phosphate dépend de la durée de la saison de croissance, de la teneur en nutriment du sol (voir tableau 3.2) et du taux de décomposition qui a été fixé à 0,02 kg pour le potassium et par jour et à 0,0025 kg pour le phosphate et par jour :

$$WE = (DGS * (2/3)) / 365 * RW * NC \quad (5.4)$$

où :

WE = nutriment décomposé (kg an⁻¹ ha⁻¹)

DGS = durée de la saison de croissance (jours)

RW = taux de décomposition (kg de nutriment kg sol⁻¹ jour⁻¹)

NC = teneur en nutriments du sol (kg nutriment ha⁻¹)

Fixation de l'azote par des micro-organismes vivant en symbiose avec des légumineuses

Pour les cultures fixatrices d'azote (niébé, niébé fourrager et arachide), on estime que 75 % de l'azote absorbé par ces plantes dérive de leur capacité spécifique de fixation de l'azote.

Fumier, résidus de récolte et engrais

L'apport externe de nutriments par le fumier, les résidus de récolte et les engrais est défini comme un intrant de nutriment pour les activités culturales. Une comparaison entre les processus d'apports et de pertes décrits plus haut montre un déficit en éléments nutritifs qui peut être compensé par le fumier, les résidus de récolte et les fertilisants. Les pertes inévitables d'azote par volatilisation, dénitrification, lessivage et érosion aux différents niveaux de production et de sources d'azote (voir [paragraphe 5.2.1](#)) sont prises en compte pour combler ce déficit. Les besoins en N sont exprimés en termes d'engrais azotés. Cela signifie que les teneurs en N des produits intermédiaires, tels que les résidus de récolte et le fumier, sont traduits en valeurs d'engrais azotés en utilisant un facteur de multiplication de 0,6 (voir fin du paragraphe 5.2.1). Le phosphate organique détient un coefficient d'intégration plus élevé que les fertilisants azotés. Il s'ensuit que P doit être multiplié par 1,25 pour donner la quantité équivalente de fertilisants phosphatés. La procédure de calcul de l'intrant N dans les activités culturales est schématisé à

la figure 5.1. Un exemple de calcul est présenté au tableau 5.3.

Figure 5.1. Procédure de calcul schématisé de l'intrant N dans les activités culturales. Les nombres se réfèrent aux étapes de la procédure présentée au tableau 5.3.

Tableau 5.3. Exemple de procédure utilisée pour calculer les besoins azotés des activités culturales. Critères de définition comme suit : sorgho, sol LIAR, sous-zone 37, intensité de production semi-extensive, utilisation des résidus libres et mesures conservation des eaux et sols, à plat.

1. Absorption de N cible

	Biomasse (kg ha ⁻¹)	Taux minimaux de N (g kg ⁻¹)	Facteurs de correction	Absorption de N (kg ha ⁻¹)
Graines	1049	10,9	1,2	13,7
Infructescences	565	2,5	1,2	1,7
Feuille	847	5,5	1,3	6,1
Tige	1573	2,0	1,3	4,1
Racine	1008	2,5	1,3	3,3
Total	5042			29 kg N ha⁻¹

2. Perte d'azote de matière organique par érosion

Erosion (a)	10 ton ha ⁻¹
Matière organique cible (b)	1,5 %
Rapport C/N (c)	15
Fraction de C dans la matière organique (d)	0,58
Perte totale (= a * 1000 * b/100 * d/c) :	5,8 kg N ha⁻¹

3. Pertes

a. par érosion (fraction de la couche supérieure)	$10 \text{ ton ha}^{-1} / (1400 \text{ kg m}^{-3} * 0,25 \text{ m} * 10) =$	0,0029
b. pertes azote inorganique :		
b1. volatilisation et dénitrification (fraction)	0,3	
b2. lessivage :		
[b2] infiltration	840 mm	
[b2] percolation	124 mm	
[b2] fraction percolée	$124/840 = 0,15$	
[b2] fraction de N dans l'eau percolée	0,7	

[b2] fraction de N perdue par lessivage	$0,7 * 0,15 = 0,10$	
perte (= b1+b2)	$0,3 + 0,1 = 0,40$	
correction pour niveau d'intensité	0,75	
fraction pertes N d'origine inorganique	$1 - ((1 - 0,4) * 0,75) =$	<u>0,55</u> +
Pertes totales (fraction)		0,56

4. Apports naturels	kg N <u>ha⁻¹</u>	perdes N <u>3 a+b</u>	efficacité N <u>org./inorg.</u>	disponibilité d'azote
a. Pluie (=877 mm*0,0065 kg N mm ⁻¹)	5,7	0,56	1	$5,7*(1-0,56)*1$
b. Fix. par bact. associés (=4034 kg ha ⁻¹ *0,0002 kg N kg ⁻¹)	0,8	0,56	0,6	$0,8*(1-0,56)*0,6$
c. Fix. par bact. libres (=5230 kg ha ⁻¹ *0,00025 kg N kg ⁻¹)	1,3	0,56	0,6	$1,3*(1-0,56)*0,6$
d. Mat. org. recyc. (=1008 kg ha ⁻¹ *0,0025 kg N kg ⁻¹ *1,3)	<u>3,3</u>	0,56	0,6	$\frac{3,3*(1-0,56)}{*0,6}$
Apports totaux	11,1			4,0 kg N ha⁻¹

5. Besoins en azote

Absorption cible (kg N ha ⁻¹)- Voir étape 1	29	
Perte de N dans la matière organique par érosion (kg N ha ⁻¹) - Voir étape 2	<u>5,8</u>	±
	34,8	
Apports naturels (kg N ha ⁻¹) - Voir étape 4	<u>4,0</u>	=
a. N-manquant (kg N ha ⁻¹)	30,8	
Fraction perte d'azote de l'engrais - Voir étape 3a +b	0,56	
N apporté par l'engrais (30,8 / (1 - 0,56)) :		69 kg N ha⁻¹

Il convient de noter que le processus de perte par fixation de K et le processus d'apport par décomposition du potassium et du phosphate ne satisfont pas au préalable d'équilibre des réserves de nutriments pour les activités culturales. Ces processus sont limités à long terme et il ne sont de ce fait pas durables. La fixation de K et le processus de décomposition de K peuvent compenser l'un ou l'autre de ces processus mais, à long terme, l'apport de phosphate décomposé entraînera une sous-estimation de

l'intrant P calculé pour les activités culturelles.

5.2.3. Phosphate

Le phosphate est un nutriment relativement immobile comparé à l'azote et au potassium. Il est donc l'objet d'une approche spécifique. Au Mali, les niveaux actuels de phosphate sont bas et un apport initial d'engrais phosphaté sera irréversiblement fixé par les particules du sol : la disponibilité en P pour les plantes sera faible. Pour un certain apport de phosphate cependant, une situation d'équilibre sera atteinte : à long terme, fixation de P et désorption seront en équilibre. L'intervalle de temps dans lequel cet équilibre sera réalisé (plus de 10 ans) satisfait aux conditions utilisées dans l'approche de recherche EMS. Une situation d'équilibre est par conséquent supposée dans l'analyse qui suit.

Pour déterminer les besoins en P des activités culturelles, on utilise un modèle développé par Wolf *et al.* (1987) dont le principe de base est illustré à la figure 5.2.

Figure 5.2. Structure du modèle utilisé pour le P. Voir le texte pour les explications et les abréviations.

Ce modèle établit une distinction entre deux pools dynamiques de phosphate : un pool labile et un pool stable. Seul le phosphate du pool labile peut être absorbé par la culture, soit une fraction annuelle de ce pool. La fraction P labile (ABS_LAB) disponible pour la culture dépend des caractéristiques pédologiques. Les alfisols et utisols détiennent une capacité fixatrice de P moyenne, indiquée par « M » dans le tableau 3.2, d'autres sols à faible capacité fixatrice de P étant marqués « F ». La fraction de P disponible pour les cultures varie de 0,1 à 0,2 par rapport aux premiers sols mentionnés, cette fraction étant plus élevée pour les derniers, variant de 0,2 à 0,35. Cette dernière fraction (0,35) est applicable aux cultures inondées. Pour les cultures pluviales, la fraction de P labile disponible pour les cultures est, selon la capacité fixatrice de P du sol considéré, la fraction minimum plus la différence entre la fraction minimum et maximum multipliée par le facteur de correction dépendant du pH du sol :

$$\text{ABS_LAB} = \text{ABS_MIN} + \text{CPH} * (\text{ABS_MAX} - \text{ABS_MIN}) \quad (5.5)$$

où :

ABS_LAB = fraction de P labile disponible pour la culture

ABS_MIN = fraction minimum de P labile disponible pour la culture

ABS_MAX = fraction maximum de P labile disponible pour la culture

CPH = facteur de correction pour le pH du sol

Le facteur de correction pour le pH du sol tient compte des différences de disponibilités en P aux différents niveaux de pH. Pour des valeurs basses des composés phosphatés aluminiques et ferriques sont formés, tandis que pour des valeurs de pH élevées, le phosphate calcique précipitera. Le facteur de correction pour le pH est déterminé ainsi :

$$\text{CPH} = (-\text{PH}^2 + 2*\text{PMX} + \text{PMN}^2 - 2*\text{PMX}*\text{PMN}) / (\text{PMN}^2 - 2*\text{PMX}*\text{PMN} + \text{PMX}^2) \quad (5.6)$$

où :

PH = pH couche supérieure (voir tableau 3.2)

PMX = valeur de pH maximum pH fixée à 5,5

PMN = valeur minimum de pH fixée à 4

La valeur minimum de ce facteur de correction pour le pH du sol a été fixée à 0, le maximum étant 1.

Le pool stable (PTAB dans la [figure 5.2](#)) est un tampon (d'engrais) à libération lente qui approvisionne le pool labile selon un taux de transfert indiqué par KSL sur la figure 5.2. Les taux de transfert situés entre le pool labile et le pool stable sont décrits comme des fractions fixes des deux tailles de pools. Le taux de transfert entre le pool labile et stable a été fixé à 0,2 an⁻¹ et entre le pool stable et le pool labile à 0,03 an⁻¹.

Le phosphate des ressources naturelles (décomposition et précipitations ; STAN sur la figure 5.2) réapprovisionne le pool stable, tandis que les résidus de récolte (LABN sur la figure 5.2) réapprovisionne le pool labile. La quantification de ces processus d'apport est effectuée comme décrit au [paragraphe 5.2.2](#).

Selon le type de fertilisant phosphaté utilisé, son épandage réapprovisionnera le pool labile et le pool stable. On suppose que le superphosphate utilisé présente une fraction labile de 0,8 et une fraction stable de 0,2. A noter que la composition d'autres engrais phosphatés peut être différente, la fraction stable des phosphates naturels est, par exemple, de 0,8 et sa fraction labile de 0,2.

Dans une situation d'équilibre, la taille du pool labile peut être déterminée de la manière suivante :

$$\text{PLAB} = \text{ABS}_P / \text{ABS}_{\text{LAB}} \quad (5.7)$$

où :

PLAB = pool labile (kg labile P ha⁻¹)

ABS_P = absorption de P total par la culture (kg P ha⁻¹)

La quantité d'engrais phosphaté requis dans une situation d'équilibre peut être déterminé ainsi :

$$\text{PENG} = \text{ABS}_P - \text{STAN} - \text{LABN} \quad (5.8)$$

où :

PENG = engrais P (kg P ha⁻¹)

STAN = apport annuel de P stable en provenance des ressources naturelles (kg P ha⁻¹)

LABN = apport annuel de P labile en provenance des ressources naturelles
(kg P ha⁻¹)

La taille du pool de P stable dans une situation d'équilibre est déterminée par la formule :

$$\mathbf{PTAB = (STAN + KLS * PLAB + PENGL) / KSL} \quad \mathbf{(5.9)}$$

où :

PTAB = pool stable (kg P stable ha⁻¹)

KLS = taux de transfert de pool labile à stable (an⁻¹)

PENGL = engrais P labile (kg P labile ha⁻¹)

KSL = taux de transfert de pool stable à labile (an⁻¹)

Le résultat final de ce modèle simple utilisé dans les tableaux d'intrants / extrants des activités culturales est PENG augmenté de la quantité de P dans le sol perdu par érosion comme décrit au [paragraphe 5.2.2](#). Il est défini comme un apport similaire aux besoins en N et K déterminés dans ce même paragraphe. Les besoins en P ainsi déterminés sont probablement sous-estimés pour deux raisons : d'une part parce qu'il est tenu compte de la décomposition de P comme étant une ressource durable de P et, d'autre part, parce qu'il n'est pas tenu compte des pertes de P. Ce dernier aspect est en cours d'étude. Il semble en effet que, dans les conditions prévalant en Europe de l'Ouest en matière d'agriculture, le phosphate est sujet à des processus de pertes ; des preuves et une quantification de ces pertes dans les conditions soudano-sahéliennes manquent cependant.

5.3. Main d'oeuvre

Les besoins en main d'oeuvre pour les travaux aux champs dépend d'un certain nombre de variables : le type de culture, le niveau de rendement, l'équipement disponible, la technique de production appliquée et surtout, le type de sol. Comme indiqué à la [section 4.1](#) les techniques culturales susceptibles d'accroître les capacités de stockage en surface ne sont, par exemple autorisées que sur des sol sensibles au ruissellement. Le type de sol détermine en outre le début et la fin de la saison de croissance (voir [paragraphe 4.1.2](#)) et par conséquent les périodes de pointe potentielles d'emploi de la main d'oeuvre (semis et récolte par exemple). Chaque opération est caractérisée par le temps requis pour récolter un ha ou un kg de produit ou de résidus de récolte, et la période pendant laquelle cette opération a lieu. Les besoins en main d'oeuvre pour ces opérations sont basés sur Van Heemst *et al.* (1981), Van Duivenbooden *et al.* (1991) et CMDT/IER/DRSPR (1990) et définis comme étant le nombre d'hommes-jour requis pour effectuer une opération y compris le temps de déplacement. Les opérations ont été identifiées et les besoins en main d'oeuvre définis pour tous les niveaux de production ([voir annexe IV](#)).

On suppose ainsi qu'au niveau de production extensive, aucune traction animal et aucun outil n'est utilisé. Les opérations effectuées à ce niveau de production requiert la seule main d'oeuvre humaine. Les différences en besoins de main d'oeuvre entre le niveau de production extensif et les autres niveaux sont liées aux disponibilités en traction animale et aux niveaux de rendement plus élevés requis aux niveaux de production plus intensive. La récolte et le battage dépendant essentiellement du rendement, les besoins de main d'oeuvre augmentent généralement dans l'ordre : niveau de production extensive, semi-extensive, semi-intensive et intensive, comme l'indique le tableau 5.4 à l'exemple du sorgho. De plus, on suppose que des niveaux de rendement plus élevés demandent une meilleure préparation et un meilleur entretien du sol pendant la saison de croissance (sarclage des mauvaises herbes, éloignement des oiseaux) et par conséquent une main d'oeuvre accrue.

Les besoins de main d'oeuvre pour le battage des céréales et l'irrigation ne sont pas associés à une période particulière de l'année. En conséquence, les besoins en main d'oeuvre pour ces opérations sont répartis également sur toutes les périodes.

Tableau 5.4. Besoins de main d'oeuvre (hommes jour⁻¹) pendant des périodes distinctes pour effectuer des opérations aux quatre niveaux de production. Exemple : sorgho cultivé sur les types de sols SZ_37, LISA_f, pendant une année normale, sans mesures de conservation des eaux et des sols, les résidus n'étant pas ramassés.

Périodes	Niveaux de production			
	extensive	semi-extensive	semi-intensive	intensive
1. Amendements matière organique	0	1	2	3
2. Préparation du sol	5	8	10	17
3. Semis	5	5	2	3
4. Entretien-1	0	14	15	16
5. Entretien-2	16	17	26	47
6. Récolte	10	10	23	35
7. Hors récolte	0	1	2	3
8. Reste de l'année	67	56	56	74
Total	104	111	135	197

Les périodes pendant lesquelles certaines opérations doivent être effectuées ont été identifiées. Certaines opérations doivent être conduites à des moments bien précis, tels la préparation du champ et le semis. Le fait de les retarder peut menacer le rendement. Ces périodes sont indiquées au tableau 5.4. Les jours disponibles pour effectuer des opérations pendant chacune des période ont été fixés. Pour les cultures

pluviales, un nombre additionnel de jour est disponible dans chaque période ; il est défini comme une fraction de la saison de croissance. Plus la durée de la saison de croissance est longue, plus il y a de temps disponible (en termes absolus) pour effectuer les opérations pendant une certaine période. La distinction en périodes permet d'identifier les pics pendant la saison de croissance. En ajustant les jours disponibles aux besoins en main d'oeuvre pour les opérations requises pendant chaque période, on peut identifier les pics de main d'oeuvre (voir tableau 5.5) : pendant les périodes entretien-1 et récolte, plus d'une personne est requise pour effectuer toutes les opérations nécessaires.

Tableau 5.5. Jours disponibles par périodes distinctes pour effectuer les opérations requises et le temps de main d'oeuvre requis (en jour) pour chaque période. Exemple : le mil cultivé sur les types de sols SZ_37, LISA_f, pendant une année normale, pour un niveau de production semi-intensive, sans mesures de conservation des eaux et des sols, les résidus de récolte n'étant pas ramassés.

Périodes	Jours disponibles	Besoins en main d'oeuvre
1. Amendements matière organique	20	2
2. Préparation de sol	13	10
3. Semis	4	2
4. Entretien-1	12	15
5. Entretien-2	97	26
6. Récolte	7	23
7. Hors récolte	20	2
8. Reste de l'année	192	56
Total	365	135

Le début et la fin de la période agricole sont déterminés par le sol, le climat et le type de culture, comme indiqué au [paragraphe 4.1.2](#). Etant donné les variations selon les sites, les besoins de main d'oeuvre liés aux différentes périodes qui en découlent sont transformés en besoins de main d'oeuvre par décade dans le cadre d'un calendrier fixe. Du fait aussi que la saison de croissance peut varier considérablement d'une sous-zone à l'autre, les périodes ainsi différenciées ne coïncident pas forcément. La période de récolte dans une sous-zone peut coïncider avec la période d'entretien-1 dans une autre, même pour une même culture. Cette conversion des besoins de main d'oeuvre en temps calendrier fixe a l'avantage de permettre une comparaison des pics de main d'oeuvre entre les sous-zones et une migration de la main d'oeuvre entre les sous-zones dans le modèle PLBM.

Les périodes distinctes peuvent être décrites comme suit :

1. Amendement de la matière organique

La période d'apport de matière organique est utilisée seulement pour les résidus arrachés à la fin de la saison précédente. Cette période commence 20 jours avant la préparation de sol.

2. Préparation de sol

La période de préparation de sol commence de 7 à 10 jours avant le semis et peut comprendre les opérations de grattage, houage, labour du sol, billonnage (manuel ou mécanique ; cloisonné ou non), hersage, préparation des semences et premier épandage d'engrais.

3. Semis

Pendant la période de semis, on ne considère que le semis qui peut être fait manuellement ou avec le semoir. Deux jours ont été retenus pour cette période.

4. Entretien-1 et 2

Deux périodes d'entretien ont été retenues. La première période est de 10 jours pour les céréales, 5 jours pour les légumineuses et 8 jours pour le coton. Les opérations qui selon la culture et l'intensité doivent être achevées dans cette période sont : le démarriage, un deuxième épandage d'engrais, le sarclage (manuel ou mécanisé) et une première pulvérisation d'insecticides. Pour assurer une bonne démarche, il est important que ces travaux soient vite faits après l'installation de la culture. Pour la deuxième période d'entretien, plus de temps est disponible. Elle se situe entre la fin de la première période d'entretien et le début de la période de récolte. Les opérations incluses sont : un troisième épandage d'engrais, un deuxième sarclage (manuel ou mécanisé), une deuxième pulvérisation d'insecticides et la surveillance contre les attaques des oiseaux.

5. Récolte

La période de récolte est 7 jours pour les céréales et l'arachide qui sont récoltés en une seule fois. Pour le niébé et le coton qui sont récoltés en plusieurs fois, cette période est de respectivement 21 et 30 jours.

6. Hors récolte

La période hors récolte n'est pas utilisée dans les activités culturales. C'est la période où les résidus servent aux activités d'enfouissement. Elle dure 20 jours.

7. Reste de l'année

Pendant le reste de l'année (la saison morte) c'est surtout la lutte anti-érosion qui prévaut. La quantification des travaux anti-érosion à effectuer à un certain niveau est difficile et son résultat n'est pas satisfaisant. Dans l'approche, le coût de l'érosion se situe à deux niveaux : les coûts de remplacement de la matière organique et des éléments nutritifs perdu par l'érosion tolérée, ainsi que les coûts de main d'oeuvre et le capital requi pour limiter les pertes au niveau toléré. Le besoin de main d'oeuvre est calculé à partir de la distance entre les cordons pierreux à construire pour minimiser les pertes. Nous supposons que cette distance correspond à peu près à la longueur du champ dans l'équation universelle de pertes de sol (voir [section 6.3](#)). La norme applicable aux besoins de main d'oeuvre est tirée de Hijkoop *et al.* (1991), soit 15 hommes-jour par 100 m de cordons pierreux. Nous avons supposé un amortissement étalé sur 10 ans pour les constructions anti-érosion. Les autres opérations de saison morte sont l'arrachage des résidus de récolte (s'ils sont utilisés l'année suivante) et le nettoyage du champ. Le battage et le vannage des produits principaux bruts ont été étalés sur toute l'année.

5.4. Boeufs de labour

A l'exception des niveaux de production extensive, tous les autres niveaux utilisent la traction animale pour les différentes opérations culturales : grattage, labour du sol à plat, labour du sol en billons, hersage, semoir, sarclage et labour du sol par enfouissement. De plus, la traction animale est utilisée pour le transport des produits finis et intermédiaires (voir aussi [chapitre 7](#)). La traction animale est exprimée en attelage-jour, représentant le travail effectué par une paire de boeufs pendant une journée de travail.

Pour la quantification des besoins en traction animale, on utilise la même approche que celle décrite à la [section 5.3](#) pour les besoins de main d'oeuvre. Les opérations de traction animale sont identifiées et les besoins en boeufs définis en fonction des opérations à réaliser. Chacune de ces opérations est caractérisées par le besoin d'attelage-jour requis par ha et par la période pendant laquelle cette opération est effectuée. L'attelage-jour requis pour les opérations dérive de Van Heemst *et al.* (1981), Van Duivenbooden *et al.* (1991) et CMDT/IER/DRSPR (1990).

Tableau 5.6. Besoins en animaux (attelage-jour) pendant les périodes distinctes pour les opérations prévues aux quatre niveaux de production. Exemple : sorgho cultivé sur des sols de type SZ_37, LISA_f, pendant une année normale, sans mesures de conservation des eaux et des sols, les résidus n'étant pas ramassés.

Périodes	Niveaux de production			
	extensive	semi-extensive	semi-intensive	intensive
1. Amendement de la matière organique	0	0	0	0
2. Préparation du sol	0	12	12	18
3. Semis	0	0	2	2
4. Entretien-1	0	4	4	4
5. Entretien-2	0	0	0	0
6. Récolte	0	0	1	4
7. Hors récolte	0	0	0	0
8. Reste de l'année	0	0	0	0
Total	0	16	19	28

Les opérations nécessitant la traction animale qui sont effectuées pendant ces périodes correspondent aux opérations nécessitant une main d'oeuvre, comme décrit à la [section 5.3](#). De même que pour les besoins de main d'oeuvre, ces périodes sont converties en besoins d'animaux de traction par décade, sur une base annuelle.

La traction animale est également utilisée pour le transport des produits finis ou intermédiaires (transport

de résidus et de matière organique au champ), tel que décrit au [chapitre 7](#).

Concernant le transport de produits finis, quatre modes ont été définis (ordre de capacité croissante) : homme (sur la tête), à dos d'ânes, charrette tirée par des ânes, char à boeufs. Les caractéristiques de ces modes de transport sont présentées au tableau 5.7.

La capacité de transport par voyage peut être déterminée en fonction de la densité du produit transporté. Le facteur le plus limitant est donc le poids ou le volume. Voir [l'annexe IV](#) pour les valeurs de densité spécifique des récoltes. On suppose que le poids des produits récoltés correspond aux poids de matière sèche calculés (voir la section 4.4). Pour les produits d'une densité de 600 kg m^{-3} , la capacité par voyage est de 20, 100, 500, et 1000 kg respectivement pour le transport par l'homme, à dos d'âne, par charrette tirée par un âne et par char à boeufs. La capacité maximum de transport quotidien pour ces modes est de : 80 kg homme^{-1} , 400 kg âne^{-1} , $1000 \text{ kg par charrette-âne}$ et $2000 \text{ kg par char à boeufs}$.

Tableau 5.7. Caractéristiques des modes de transport distincts.

		Mode de transport			
		tête	dos âne	charrette-âne	char à boeufs
Caractéristiques de transport :					
Vitesse	km h ⁻¹	4	4	2	2
Capacité : poids	kg voyage ⁻¹	20	100	500	1000
Capacité : volume	m ³ voyage ⁻¹	0,75	0,5	2,5	5
Heures de travail	h jour ⁻¹	6	6	6	6
Distance village-champ	km	8	8	8	8
Voyages par jour		4	4	2	2
Besoins par jour de transport :					
Hommes		1	1	1	1
Anes		0	1	2	0
Boeufs		0	0	0	2
Charrettes		0	0	1	0
Chars à boeufs		0	0	0	1

On établit aussi une répartition des modes de transport en fonction des niveaux de production (voir tableau 5.8). Cela signifie par exemple qu'au niveau de production extensive, 25 % du transport est effectuée par la main d'oeuvre humaine, 65 % à dos d'âne et 10 % par charrette-âne. Sur la base de l'exemple du paragraphe précédent, on calcule ainsi le transport maximum quotidien au niveau de production extensive : $0,25 * 80 \text{ kg jour}^{-1} + 0,65 * 400 \text{ kg jour}^{-1} + 0,1 * 1000 \text{ kg jour}^{-1} = 380 \text{ kg jour}^{-1}$,

soit 0,0026 jour kg⁻¹.

Tableau 5.8. Répartition des modes de transport en fonction des niveaux de production (en %).

Niveau de production	Mode de transport			
	tête	dos âne	charrette-âne	char à boeufs
extensive	25	65	10	0
semi-extensive	0	50	50	0
semi-intensive	0	20	60	20
intensive	0	20	20	60

Une fois calculés le temps nécessaire au transport par kg, la répartition des modes de transport et la quantité de produits à transporter, il est possible de déterminer le temps total nécessaire au transport, en termes de main d'oeuvre, d'animaux et d'équipement (charrette ou char) pour chaque niveau de production.

5.5. Capital et intrants consommables

Le capital et les intrants consommables comprennent l'équipement et les intrants variables. En matière de capital, les besoins pour une activité culturale dépendent du type de culture et du niveau de production appliqué. L'équipement pris en compte comprend : semoir, multiculteur, pulvérisateur, charrette et char. Ces deux derniers sont utilisés pour le transport du produit principal (voir [section 5.4](#)) et les activités de transport des produits intermédiaires décrites au [chapitre 7](#). Les prix, la période d'amortissement et les coûts d'entretien sont basés sur les estimations de l'IER (voir tableau 5.9). L'estimation du capital nécessaire pour la lutte anti-érosion s'appuie sur les données de Vlaar (1992) pour la construction des cordons pierreux. Les coûts comprennent essentiellement le transport des pierres et sont exprimés en 100 m de cordon pierreux.

Tableau 5.9. Prix, amortissement et entretien (pièces détachées) (en FCFA).

Equipement	Prix d'achat	Durée d'amortissement (année)	Amortissement	Pièces détachées	Coûts par année
Multiculteur	74 335	7	10 619	1 720	13 401
Semoir	66 693	10	6 669	170	7 506
Charrette	77 250	10	7 525	640	9 138
Char	128 750	10	12 875	1 280	15 443
Herse	23 175	10	2 318	0	2 549

Pulvérisateur	15 045	6	2 575	325	3 158
Paire de boeufs	100 425	5	20 085	-	22 094
Paire d'ânes	51 500	10	5 150	-	5 665
Cordons pierreux (par 100 m)	10 000	10	1 000	-	1 000
Paire d'ânes	51 500	10	5 150	-	5 665

Les intrants consommables comprennent les semences, les pesticides pour la protection des semis et les biocides. Ces derniers intrants augmentent avec l'intensité du niveau de production. On suppose que plus les rendements sont élevés, plus il est nécessaire d'utiliser des agents de protection des récoltes, celles-ci devenant plus sensibles aux maladies et aux attaques parasitaires. Les intrants consommables pour chaque niveau de production sont présentés à [l'annexe IV](#). Voir le tableau 5.10 pour les prix des intrants consommables.

Tableau 5.10. Prix des intrants consommables (en FCFA).

Intrants	Unité	Prix intrant
Semences	kg ⁻¹	50
Pesticides protection semis	kg ⁻¹	50 000
Pesticides	l ⁻¹	2 505
N	kg ⁻¹	360
P	kg ⁻¹	653
K	kg ⁻¹	360
Fumier	kg ⁻¹	7

6. Les extrants des cultures

Outre les rendements des récoltes dérivés du [chapitre 4](#), deux autres extrants sont pris en compte : les résidus de récolte, les nutriments des résidus y compris la capacité d'immobiliser des ressources d'azote. Ce chapitre décrit comment ces extrants sont déterminés et quelles hypothèses ont été formulées. Bien que l'érosion du sol n'ait pas été définie comme un extrant, les pertes de sols ont un impact indirect sur plusieurs intrants, par exemple les nutriments, la matière organique et les besoins de main d'oeuvre. La [section 6.3](#) explique par conséquent la manière dont l'érosion du sol est traitée.

6.1. Résidus de récolte

Deux types de résidus ont été définis pour les activités culturales : (i) feuilles et tiges ; (ii)

infructescences. Les racines ne sont pas considérées comme des résidus de récolte pouvant être utilisés dans d'autres activités agricoles. Elles restent toujours dans le champ et contribuent donc toujours (en partie) à l'apport de MOST et aux besoins en nutriments de l'activité culturale qui a produit les racines (voir [section 5.1](#) et [section 5.2](#)). La répartition de la biomasse cible estimée, produite par les différentes parties de la culture est décrite à la section 4.4.

Dans les matrices d'intrants/extrants des activités culturales, les feuilles et les tiges produites sont définies comme *résidus de récolte au champ* susceptibles d'être utilisés pour des activités intermédiaires : (i) paillis pour réduire l'érosion du sol et comme contribution aux réserves de matière organique du sol, (ii) brûlis sur place, (iii) enfouissement dans le sol pour maintenir les ressources de matière organique, (iv) mélange avec le fumier, à la ferme, pour exploiter la capacité fixatrice d'azote de la paille, (v) chaume abandonné sur le champ pour la pâture or (vi) ramassage pour l'affouragement des animaux en stabulation. Toutes ces stratégies accompagnent les options de production durable applicables à la région soudano-sahélienne. L'extrait des stratégies (v) et (vi) constitue un intrant des rations alimentaires administrées aux animaux pour satisfaire aux objectifs de production des activités d'élevage. Les rations alimentaires sont décrites par [Bakker et al. \(1996a\)](#). Les quatre autres stratégies d'utilisation des résidus de récolte incluent dans le modèle PLBM sont définies comme des activités indépendantes, comme souligné au [chapitre 7](#).

Un second extrait des résidus de récolte est constitué par les infructescences en tant que partie du produit récolté non utilisé pour la consommation humaine après battage. Ce résidu est transporté à la ferme avec la partie consommable de la récolte. La quantité d'infructescences (exprimée en UMO ha⁻¹) est définie comme *MOST à la ferme*; il en est tenu compte dans les coefficients intrants/extrants des activités culturales. En fonction de sa composition, l'infructescence est traduite en matière organique standard, comme décrit à la [section 5.1](#). Après avoir été transportée sur le champ, la quantité de MOST peut être utilisée pour réapprovisionner les stocks de matière organique du sol. La MOST à la ferme n'a pas été définie pour le coton parce que l'infructescence correspond au produit principal. Ceci est également valable pour le bourgou, stylosanthes, andropogon et andropogon repousse qui sont cultivés pour leurs feuilles et leurs tiges, et sont récoltés avant que leurs organes floraux ne se développent.

6.2. Nutriments à la ferme et capacité d'immobiliser l'azote

Les nutriments (N, P et K) sont transportés à la ferme avec les infructescences (MOST à la ferme). La quantité de nutriments ainsi transportée est calculée sur la base de la quantité de MOST et de la concentration en nutriments de cette dernière. Les concentrations appliquées, selon les parties de cultures considérées sont indiquées à [l'annexe IV](#). L'approche utilisée est la même que celle décrite au [paragraphe 5.2.1](#), pour le calcul de la quantité de nutriments transportée du champ avec le produit principal.

Considérant que l'azote de sources organiques détient un coefficient d'efficacité inférieur aux engrais azotés, la quantité d'azote contenue dans la MOST est multipliée par 0,6 (voir paragraphe 5.2.1). Le phosphate organique ayant un plus grand coefficient d'efficacité que les engrais phosphatés, le P contenu dans la MOST est donc multiplié par 1,25 pour donner la quantité équivalente de fertilisants phosphatés.

La volatilisation peut être considérablement réduite en mélangeant de la matière organique d'un rapport C/N élevé - l'infructescence par exemple - à des sources d'azote volatile telles que le fumier. La MOST à la ferme détient également la capacité de fixer l'azote volatile dans le fumier. Pour pouvoir exploiter cette option, on estime la capacité fixatrice de N de la MOST à la ferme en se basant sur la différence entre la teneur en N d'un mélange d'infructescences et de fumier, et la teneur en N des infructescences (MOST à la ferme) multiplié par le facteur tenant compte du coefficient d'efficacité inférieur des sources organiques de N :

$$\text{CAP} = (\text{TLN} - \text{TIN}) * \text{NF} \quad (6.1)$$

où :

CAP = capacité d'immobiliser N (kg N kg⁻¹)

TLN = taux d'azote des infructescences après mélange avec le fumier (kg N kg⁻¹)

TIN = taux d'azote des infructescences (kg N kg⁻¹)

NF = facteur de correction appliqué au coefficient d'efficacité de N de sources organiques (voir [par. 5.2.2.](#))

La teneur en N dans la MOST à la ferme/ mélange de fumier (TLN) a été fixée à 0,01 kg N kg⁻¹, tandis que la teneur en N dans les infructescences (MOST à la ferme) est calculée selon la même procédure utilisée pour les autres parties de la culture (voir [par. 5.2.1](#)). La valeur minimum de la capacité d'immobilisation de l'azote est de 0 kg N kg⁻¹.

6.3. Erosion

La dégradation du sol, en particulier son érosion, est l'un des processus majeurs affectant le potentiel de production de la région soudano-sahélienne (Berckmoes *et al.*, 1990 ; Berthe *et al.*, 1991). Dans cette étude, on a utilisé l'équation universelle de pertes de sol, USLE (Universal Soil Loss Equation) développée par Wischmeier & Smith (1960) pour quantifier l'érosion du sol. Cette équation a été développée à l'origine pour les conditions en vigueur aux Etats-Unis. Elle doit donc être utilisée avec prudence dans des environnements différents, notamment dans les conditions prévalant dans la région soudano-sahélienne. Quoi qu'il en soit, cette équation permet d'estimer valablement les écarts à long terme, en fonction des mesures de gestion des cultures et des sols. Roose (1977) a par ailleurs étalonné l'USLE pour la rendre extrapolable aux conditions ouest-africaines, en introduisant des données empiriques pour renforcer son application. Sa méthode et les valeurs qu'il a données aux variables ont été utilisées telles quelles et ce rapport ne s'est donc pas étendu sur leur calcul.

L'USLE estime des pertes de sol sur la base des caractéristiques de pluviosité, des propriétés des sols, des paysages, ainsi que de la gestion des sols et des cultures appliquée.

$$\text{E} = \text{R} * \text{K} * \text{L} * \text{C} * \text{P} \quad (6.2)$$

où :

E = érosion (ton ha⁻¹)

R = facteur de pluviosité

K = facteur d'érodibilité

L = facteur de paysage

C = facteur de couverture de la culture

P = facteur de gestion des sols

Facteur de pluviosité (R)

Le facteur de pluviosité (R) est basé sur l'énergie érosive des gouttes de pluie à la surface du sol. Il est fonction des précipitations annuelles :

$$R = AR * 0,5 \quad (6.3)$$

où :

R = facteur de pluviosité

AR = précipitations annuelles (mm)

Facteur d'érodibilité (K)

Le facteur d'érodibilité (K) dépend de la texture du sol et de sa teneur en matière organique. Les sols de texture sableuse et d'une faible teneur en matière organique ont ainsi un facteur d'érodibilité plus élevé. La formule empirique appliquée tient compte de la texture du sol et de sa teneur en matière organique :

$$K = ((A + 5/3 + 10/3 * ST + 15/6 * PR - 15) / 100) * FG \quad (6.4)$$

où :

ST = coefficient de structure pédologique de Wischmeier

PR = facteur de perméabilité du sol de Wischmeier

et

$$A = 0,2 * B^2 + (8 - MO) * B \quad (6.5)$$

avec :

MO = pourcentage de matière organique cible corrigé en fonction des niveaux de production (voir [section 5.1](#)), et

où :

$$B = 0,001 * AS^2 + CS * 0,001 * AS \quad (6.6)$$

avec :

AS = pourcentage d'argile et de sable fin dans la même couche supérieure du sol (2 à 100 µm)

CS = pourcentage de sable grossier dans la couche supérieure du sol (100 à 2000 µm)

Les taux d'argile, de sable fin et de sable grossier dans la même couche supérieure peuvent être dérivés du tableau 3.2.

La variable FG dans la formule (6.4) est un facteur de correction pour la fraction gravillonnaire de la couche supérieure du sol (voir tableau 3.2) :

$$FG = 1 - GRF \quad (6.7)$$

où : GRF = fraction gravillonnaire

L'explication des variables ST et PR de Wischmeier figure au [paragraphe 3.1.2](#) ; leurs valeurs pour les différents types de sol sont indiquées dans la classification des types de sols présentée au tableau 3.2.

Facteur de paysage (L)

Le facteur de paysage (L) dépend de la longueur de la pente et de l'angle de déclivité du champ. Toutes deux déterminent la force de l'eau d'inondation. Cette force augmente avec la longueur et la déclivité. Une équation empirique est utilisée, dans laquelle LS est fonction de la longueur de la pente et de la déclivité du champ.

$$L = (LF / 0,3048)^{0,5} * (0,76 + 0,53 * SL + 0,076 * SL^2) / 100 \quad (6.8)$$

où :

L = facteur de paysage

LF = longueur de la pente (m)

SL = déclivité (%)

Les pentes sont dérivées de la classification des types de sols présentée au tableau 3.2.

Facteur de couverture de la culture (C)

Le facteur de couverture de la culture (C) se base sur le taux de sol perdu mesuré dans des conditions de culture et de sol spécifiques, par rapport à une jachère pure. Le facteur de couverture de la culture décroît avec l'augmentation de la couverture du sol. Les cultures ayant une couverture de sol plus élevée du fait de leur architecture, ou une production de biomasse plus élevée, ont un facteur de couverture de culture plus bas. Du fait que les rendements diffèrent selon les niveaux de production (voir [section 4.3](#)), les facteurs C correspondant à ces niveaux ont été en conséquence ajustés. [L'annexe IV](#) présente les facteurs C appliqués aux différents niveaux de production. Pour le niébé par exemple, C varie entre 0,3 et 0,1, contre 0,4 et 0,7 pour le mil.

En tant que couverture, le paillis a un effet réducteur similaire sur l'érosion du sol. Pour intégrer cet effet, les facteurs C des niveaux de production ont été multipliés par un facteur tenant compte de la couverture du sol par le paillis :

$$\mathbf{RENP = 1 - 1,8 * COU + 0,86 * COU^2} \quad (6.9)$$

où : RENP = facteur de paillage et

$$\mathbf{COU = (1 - e (-0,00045 * ENP))} \quad (6.10)$$

où : COU = couverture du sol par paillis

ENP = quantité de résidus de récolte utilisés comme paillis (kg ha⁻¹)

En l'absence de paillage, COU dans la formule (6.10) devient 1, le facteur de paillage (RENP) prenant en conséquence la même valeur, ce qui signifie que le facteur C n'est pas ajusté. Le paillis entraîne un facteur de paillage inférieure à 1 qui, multiplié par le facteur C, donnera un facteur de couverture de culture réduit. La quantité de paillis est déterminée par la quantité de feuilles et de tiges produites ([section 4.3](#)).

Facteur de gestion du sol (P)

Le facteur de gestion du sol (P) exprime les mesures de conservation du sol appliquées, par exemple le labourage suivant les courbes de niveau et la culture en terrasses. Le facteur de gestion du sol a été fixé à 1 lorsque le billonnage n'est pas pratiqué. Pour des billons simples, les facteurs de gestion sont fonction des types de sol. Ces valeurs sont indiquées au tableau 3.2. Pour les billons cloisonnés, le facteur P a été fixé à 0,1.

6.3.1. Exploitation de l'USLE

Une fois déterminées les valeurs des variables, il est possible, grâce à l'USLE, d'estimer les pertes par érosion dans des situations différentes. Dans l'approche appliquée cependant, on a défini une perte cible

« tolérée » pour l'érosion du sol à ne pas excéder pour garantir la durabilité du système de production. Les pertes cibles appliquées pour les différents types de sols sont indiquées au tableau 3.2. Une longueur de pente correspondante (LF dans la formule 6.8) peut être calculée pour réaliser ces pertes de sol « tolérées ». Pour les sols particulièrement sensibles à l'érosion, les longueurs de pentes doivent être plus courtes que pour les sols moins sensibles. Des cordons de pierres peuvent être construits pour raccourcir les longueurs de pentes et réduire les pertes de sorte à rester dans les limites imposées. Ces constructions sont prises en compte dans le calcul des besoins ([paragraphe 5.3](#)) et des coûts ([paragraphe 5.5](#)) de main d'oeuvre. Quelques exemples de longueurs de pente déterminées dans des situations différentes sont présentés au tableau 6.1. Ce tableau illustre clairement aussi l'effet des différentes mesures de conservation des eaux et des sols, de la stratégie d'utilisation des résidus et du niveau de production.

Tableau 6.1. Longueur de pente calculée (en m) par l'USLE, pour obtenir les pertes de sol tolérées, pour différentes combinaison de sols, niveaux de production et stratégies d'utilisation des résidus de récolte (SZ_37, sorgho, année normale).

			Types de sol		
Niveaux de production:	Type de billonnage:	Stratégie d'utilisation des résidus:	LISA_f	LILI	GR
			10 ton ha ^{-1**})	10 ton ha ⁻¹	5 ton ha ⁻¹
extensive	simple	libre*)	8	11	2
	simple	paillage	102	130	21
	à plat	libre	3	4	< 1
	à plat	paillage	23	26	3
semi-extensive	cloison	libre	336	457	48
	cloison	paillage	9 891	> 10 000	1 405
	à plat	libre	3	5	< 1
	à plat	paillage	40	43	6
semi-intensive	cloison	libre	504	703	72
	cloison	paillage	> 10 000	> 10 000	>10 000
	à plat	libre	53	7	< 1
	à plat	paillage	465	549	24
intensive	cloison	libre	810	1 148	116
	cloison	paillage	>10 000	>10 000	>10 000
	à plat	libre	8	11	1
	à plat	paillage	1 538	2 021	76

*) signifie que les résidus de récolte peuvent être utilisés pour des activités d'enfouissement, de brûlage, d'affouragement à

la ferme ou sur le champ.

**) Perte de sol tolérée, voir aussi tableau 3.2.

Bien que l' USLE ait été développée pour les conditions prévalant aux USA, et que son extrapolation aux conditions ouest-africaines doit être effectuée avec circonspection, les écarts relatifs entre les activités reflétant valablement les différences liées aux sols, au climat, aux cultures, aux rendements, aux stratégies d'utilisation des résidus, et aux mesures de conservation des eaux et des sols. D'ailleurs, bien que les longueurs de pentes moins réalistes (courtes) aient été déterminées pour certains types de sols, les conséquences en termes de main d'oeuvre pour construire et maintenir ces murs indiquent que, pour ces sols, une production « durable » en termes de pertes par érosion est difficile à atteindre. Dans d'autres situations, les longueurs de pentes longues moins réalistes qui ont été déterminées, indiquent que les conditions définies favorisent une production « durable » en termes de pertes de sol.

7. 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 divisées en activités (i) produisant des produits intermédiaire comme extrant principal (activité de jachère et pâturage), (ii) transférant les produits intermédiaires vers une autre activité (activité de transport de résidu à la ferme et de matière organique au champ), (iii) représentant les stratégies d'utilisation des résidus de récolte (activité de paillage, d'enfouissement, de brûlage, et de fabrication de litière). Ces dernières transfèrent la MOST, les résidus de récolte et les nutriments vers diverses activités produisant des produits consommables (activité de culture et d'élevage) comme l'illustre la [figure 2.2](#). Les critères de définition et les intrants et extrants de ces activités de transformation sont indiquées au tableau 2.2.

7.1. Jachère

Les activités de jachère produisent de la MOST et des nutriments qui peuvent être utilisés comme intrants dans les activités culturelles. La production de MOST et de nutriments est fonction de la sous-zone et des caractéristiques pédologiques (voir tableau 2.2).

La biomasse produite pendant une année de jachère dépend des nutriments les plus limitants N, P ou K. En réalité cependant, l'eau est le facteur le plus limitant dans beaucoup de cas, vu que les sols soudano-sahéliens sont tellement épuisés et, par conséquent, tellement dégradés, que les ruissellements sont courants. La disponibilité en nutriments est déterminée par leur apport annuel en provenance des ressources naturelles (précipitations, fixation microbienne, et altération) comme résumé au tableau 7.1. Les mêmes processus d'apports sont pris en compte, comme décrit au [paragraphe 5.2.2](#).

Tableau 7.1. Apport annuel de nutriments en provenance des ressources naturelles déterminant la disponibilité en nutriments pendant une année de jachère, pour une production initiale de biomasse de 2250 kg ms ha⁻¹.

Azote

- dépôt : précipitations * concentration de N dans les pluies (=6,5 g mm⁻¹ de pluies)
- fixation de N par des bactéries associées : production de biomasse * fixation de N (=0,001 kg kg ms⁻¹)
- fixation de N par des bactéries libres : production de biomasse * fixation libre de N (=0,00025 kg kg ms⁻¹)

Phosphate

- dépôt : précipitations * concentration de P dans les pluies (=0,7 g mm⁻¹ de pluies)
- fixation de P par des bactéries associées : production de biomasse * fixation de P (=0,000025 kg kg ms⁻¹)
- fixation de P par des bactéries libres : production de biomasse * fixation libre de P (=0,000025 kg kg ms⁻¹)

Potassium

- dépôt : précipitations * concentration de K dans les pluies (=5 g mm⁻¹ de pluies)

Estimant qu'une végétation de jachère comprend 50 % de dicotylédones et de 50 % de monocotylédones, estimant aussi des concentrations minimums de nutriments pour les deux espèces (voir tableau 7.2) et un facteur de multiplication de 1,2 pour tenir compte du fait que les nutriments ne sont presque jamais dilués à ces concentrations minimums (Van Duivenbooden, 1992), on détermine ainsi la concentration de N, P et K dans une végétation de jachère :

$$C_{VEG_i} = 1,2 * ((1 - FDI) * C_{GR_i} + FDI * C_{DI_i}) \quad i=N, P, K \quad (7.1)$$

où :

C_{VEG_i} = concentration de N, P ou K dans la végétation de jachère (kg kg⁻¹)

FDI = fraction des dicotylédones dans la végétation de jachère

C_{GR_i} = concentration minimum de N, P et K dans les monocotylédones

(kg kg⁻¹)

C_{DI_i} = concentration minimum de N, P et K dans les dicotylédones (kg kg⁻¹)

Tableau 7.2. Concentrations minimums (en kg kg⁻¹) dans les mono- et les dicotylédones.

	Monocotylédones	Dicotylédones
Azote	0,005	0,01
Phosphate	0,0005	0,001
Potassium	0,006	0,012

La production de matière organique d'une année de jachère est estimée en divisant l'apport annuel de nutriments en provenance des ressources naturelles (= disponibilité en nutriments) et les concentrations calculées de nutriments dans des végétations de jachère (formule 7.1). L'élément nutritif le plus limitant de la biomasse la plus basse détermine ensuite la biomasse annuelle produite par une végétation de jachère. Cette production est ensuite transformée en MOST qui exprime, outre les nutriments de la MOST, l'extrait des activités de jachère.

La production de biomasse est déterminée par une procédure itérative. L'apport annuel de nutriments en provenance des ressources naturelles, c'est-à-dire la fixation de N par les bactéries, dépend de la production de biomasse disponible (voir [paragraphe 5.2.2](#)). Dans cette situation, la production de biomasse d'une végétation de jachère est à la fois un extrait et un intrant nécessaire aux calculs. Le problème est résolu en appliquant les procédures itératives de calcul offertes par EXCEL.

Il est assumé que la végétation de jachère n'est pas broutée par le bétail. Ceci implique en réalité que main d'oeuvre et capital (clôtures) sont requis pour protéger la jachère. Ces exigences ne sont cependant pas prises en compte. De plus, il est assumé que l'accumulation de biomasse sur les jachères reste stable au fil des ans, tandis qu'en réalité, la production de biomasse d'une végétation de jachère s'accroît du fait de l'accumulation de ressources naturelles (nutriments et matière organique dans le sol).

7.2. Pâturage

Les activités de pâturage produisent des qualités différentes de fourrages utilisés comme intrants alimentaires dans les activités d'élevage, et du bois qui peut être utilisé pour approvisionner la région et qui est surtout utilisé pour la cuisson. Le bois provient des espèces ligneuses qui s'installent sur les parcours communaux. Les critères de définition des activités de pâturage comprennent la sous-zone, le climat, les sols et les stratégies d'exploitation (voir tableau 2.2). Trois stratégies d'exploitation sont définies : le pâturage pendant la saison des pluies, le pâturage tout au long de l'année, le pâturage pendant la saison sèche uniquement. La méthode utilisée pour déterminer la production de fourrage est basée sur la méthode décrite par [Bremen & De Ridder \(1991\)](#). Ces auteurs estiment, dans une situation d'équilibre, la biomasse pouvant être exploitée sans en menacer la production à long terme. Dans cette méthode, la production de biomasse dépend de la dynamique de l'azote dans les systèmes de pâturage. L'azote disponible dépend de l'apport naturel annuel (pluies), des caractéristiques pédologiques (texture, profondeur du sol, position dans la toposéquence) et du taux de régénération des espèces ligneuses. La production de fourrage est classée par qualité, en fonction de la teneur en azote. Ces différentes classes sont utilisées dans les rations alimentaires décrites par [Bakker et al. \(1996a\)](#).

7.3. Brûlis des résidus

Le but du brûlis des résidus est de nettoyer le champ après la récolte. Cette activité transforme les résidus produits par les activités culturales en éléments nutritifs qui peuvent être réutilisés ensuite dans la même activité ou dans une autre activité culturale sur le même type de sol. Les critères de définition des activités de brûlis des résidus sont : la sous-zone, la culture et le sol (voir tableau 2.2). Les résidus des récoltes de mil, sorgho, maïs, coton, andropogon, riz de submersion non contrôlée, riz de submersion contrôlée, riz irrigué par gravité, riz irrigué à la pompe et sorgho de décrue, peuvent être brûlés.

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. [L'annexe IV](#) présente les besoins de main d'oeuvre pour cette opération.

Les extrants sont les éléments nutritifs P et K, en fonction de leur teneur respective dans les résidus (voir tableau 7.2). On suppose que le carbone qui reste après brûlage n'est pas actif et qu'il ne contribue pas à la restitution de matière organique au sol. On suppose également que tout l'azote se perd pendant le brûlis et qu'après brûlage, le phosphate organique a la même valeur que l'engrais.

Tableau 7.2. Exemple de procédure de calcul de l'extrait P et K des activités de brûlis des résidus de mil (production intensive).

	Répartition de la biomasse des résidus de récolte (voir annexe IV)	Taux minimaux (g kg ⁻¹)		Facteurs de correction	Extrait nutriment (g kg ⁻¹ résidu)	
		P	K		P	K
Graines	0	1,8	3	1,4	0	0
Infructescences	0	0,3	10	1,4	0	0
Feuilles	0,35	0,25	10	1,7	0,15	5,95
Tige	0,65	0,25	10	1,7	0,28	11,05
Racine	0	0,3	10	1,7	0	0
Total					0,43	17,0

7.4. Enfouissement des résidus

Cette activité a pour but d'enfouir les résidus des récoltes dans le sol de sorte à favoriser leur transformation en MOST et en éléments nutritifs. Cette activité peut être effectuée avec des résidus de millet, de sorgho, de maïs, de coton, de niébé, de niébé fourrager et d'arachide. Les extrants des activités d'enfouissement - la MOST et les éléments nutritifs - peuvent être utilisés dans le modèle-PLBM pour les

activités culturelles (comme intrants) autres que celles dont ces résidus sont dérivés. Voir le tableau 7.3 pour un exemple de procédure appliquée à la détermination des extrants MOST et éléments nutritifs des activités d'enfouissement. 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 culturelle peut contribuer à satisfaire les besoins en matière organique du sol d'une autre activité culturelle.

Tableau 7.3. Exemple de procédure appliquée à la détermination des extrants MOST et éléments nutritifs des activités d'enfouissement des résidus de mil (production intensive)

	Répartition de la biomasse des résidus de récolte (voir annexe IV)	Taux minimaux (g kg ⁻¹)			Facteurs de correction	Extrant nutriment (g kg ⁻¹ résidu)		
		N	P	K		N	P	K
Graines	0	13	1,8	3	1,4	0	0	0
Infructescences	0	3	0,3	10	1,4	0	0	0
Feuilles	0,35	5,5	0,25	10	1,7	3,27	0,15	5,95
Tige	0,65	2	0,25	10	1,7	2,21	0,28	11,05
Racine	0	3	0,3	10	1,7	0	0	0
Total						5,48	0,43	17,0
Transformation en engrais (N-total * 0,6 ; P-total * 1,25) - Voir par. 5.2.1 :						3,29	0,54	17,0

Kg C par kg de résidus de récolte : $0,58 * 1 = 0,58$ kg C/kg de résidus de récolte

Kg de C nécessaire tous les ans pour donner 1 kg de MOST (formule 5.3) = 15

Quantité d'UMO par kg de résidus de récolte : $0,58 / 15 = \mathbf{0,0397}$ UMO kg⁻¹ de résidus de récolte

Les critères des activités d'enfouissement des résidus comprennent la sous-zone, la culture et le sol (voir tableau 2.2). 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. Voir l'[annexe IV](#) pour les besoins de main d'oeuvre et de traction animale appliqués pour la préparation des résidus de récolte (hachage) et leur épandage sur le champ (en termes de MOST).

7.5. Paillage

Le paillage (mulching) sert deux objectifs : protéger le sol contre l'érosion et satisfaire les besoins en

matière d'organique des activités culturelles. Le paillage transforme les résidus des activités culturelles en MOST et en éléments nutritifs (N, P et K). Les critères de définition des activités de paillage comprennent : la sous-zone, le climat, la culture, le sol et le niveau de production (voir tableau 2.2).

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 culturelle ne peuvent pas être utilisés par les autres activités culturelles. La quantité de résidus de récolte (feuilles et tiges) utilisée pour le paillage sont transformée en MOST de manière similaire aux racines et il n'en est pas tenu compte dans l'évaluation de la teneur cible de matière organique.

Les besoins en main d'oeuvre pour le paillage sont définis pour la saison hors récolte. Ils ne concurrencent pas les autres travaux des champs. Voir [l'annexe IV](#) pour les besoins de main d'oeuvre appliqués à la récolte et à l'épandage des résidus.

7.6. Fabrication de litière

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.

La procédure permettant de déterminer l'extrait MOST et éléments nutritifs pour les activités de fabrication de litière est similaire à celle utilisée pour calculer les extraits de l'activité d'enfouissement (voir tableau 7.3). La capacité de récupération de l'azote comme extrait est quantifié selon la procédure décrite au [paragraphe 6.2](#).

L'intrant « main-d'oeuvre » est nécessaire à l'épandage des résidus comme litière. Les extraits sont la MOST et les éléments nutritifs qui se trouvent dans les résidus et la capacité d'immobiliser l'azote volatile des excréments.

7.7. Transport des résidus à la ferme

Les activités de transport déplacent les résidus produits par les activités culturelles du champ à la ferme où ils peuvent être utilisés comme fourrage ou pour la fabrication de litière. Les critères de définition de ces activités de transport comprennent la sous-zone, le sol, la culture et le mode de transport (voir tableau 2.2). Ce dernier critère inclut deux options : le transport par charrette tirée par des ânes, ou le transport humain, sur la tête. Pour déterminer les besoins de transports à la ferme, on utilise la même méthode qui a été décrite à la [section 5.3](#) pour l'évaluation du transport lié aux activités culturelles. Voir le tableau 7.4 pour les calculs relatifs à la main d'oeuvre, aux animaux et au matériel nécessaire au transport des résidus du sorgho, la densité estimée étant de 100 kg m^{-3} . Voir [l'annexe IV](#) pour les autres coefficients de densité des cultures spécifiques.

Les autres intrants sont la main d'oeuvre pour le transport par charrette ou sur la tête et le capital pour l'amortissement de la charrette et des ânes. Le transport des résidus de récolte n'a lieu que pendant la période hors récolte. Les coûts des ânes et des charrettes sont basés sur les besoins pendant cette période. Voir la [section 5.5](#) pour les coûts appliqués. L'extrait est le même résidu qui se trouve maintenant à la ferme.

Tableau 7.4. Main d'oeuvre, besoins en ânes et matériels pour le transport de résidus de sorgho à la ferme.

Besoins de transport	unité	sur la tête	par charrette
Main d'oeuvre	hj kg ⁻¹	0,0125	0,002
Anes	aj kg ⁻¹	-	0,004
Charrettes	mj kg ⁻¹	-	0,002

7.8. 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 (infructescences), des activités d'élevage, et de la production de litière.

Les critères de définition des activités de transport de matière organique comprennent la sous-zone, le sol et le mode de transport (voir tableau 2.2). Deux types de transport ont été définis - sur la tête ou charrette tirée par des ânes. La méthode est la même que celle décrite à la [section 7.7](#) pour la détermination des coûts de main d'oeuvre, des animaux et du matériel requis. On suppose une densité de 250 kg m⁻³ et un pourcentage de poids sec de 50 % pour la matière organique transportée. Les autres intrants sont la main d'oeuvre pour le transport en charrette pendant la période d'amendement en matière organique et le capital pour l'amortissement de la charrette et des ânes. Le transport de matière organique n'a lieu que pendant la période d'amendement du champ en matière organique précédant la période de préparation de ce dernier (voir [section 5.3](#)). Les coûts des ânes et des charrettes sont basés sur les besoins pendant cette période. Voir la [section 5.5](#) pour les coûts appliqués. Les intrants sont aussi les éléments nutritifs ramenés de la ferme. Ils sont transportés en même temps que la MOST. L'extrait de cette activité de transport est également l'unité de matière organique standard qui se trouve maintenant au champ.

Il convient de noter que, pour le calcul de la quantité de MOST transportée, on applique un poids standard de 17 kg UMO⁻¹. Ce poids correspond à la quantité de fumier requise pour obtenir 1 UMO. Etant donné que pour les autres résidus de récolte, il faut davantage de kilos pour obtenir 1 UMO (voir tableau 5.1), le transport de la matière organique vers le champ est légèrement sous-estimée.

Bibliographie

- Bakker, E.J., H. Hengsdijk, & J.J.M.H. Ketelaars, 1996a, [Description zootechnique quantitative des systèmes de production animale en zone soudano-sahélienne](#). Rapport PSS 27. IER/AB-DLO/DAN-WAU, 36 p.
- Bakker, E.J., & K. Sissoko, 1996b, Resultats modèle PLBM, chapitre II.4.4 dans : Intensification agricole au Sahel (Breman et Sissoko, eds.) (en prép.)
- Bationo, A. & A.U. Mokwunye, 1991, Role of manures and crop residues in alleviating soil fertility constraints to crop production : With special reference to the Sahelian and Sudanian zones in West-Africa. *Fertilizer Research* 29 : 117-125.
- Berckmoes, W.M.L., E.J. Jager & Y. Koné, 1990, L'intensification agricole au Mali-sud. Souhait ou réalité ? Royal Institute for the Tropics, KIT-Amsterdam. Bulletin no. 318, 40 p.
- Berthe, A.L. et al., 1991, Profil d'environnement Mali-Sud. Etat des ressources naturelles et potentialités de développement. IER-Mali/KIT-Amsterdam, 79 p.
- Breman, H & N. Traoré, 1987, Analyse des conditions de l'élevage et propositions de politiques et des programmes. République du Mali. Club du Sahel/CILSS, D(86)302, CABO, Wageningen, 243 p.
- 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.
- Brouwers, M. & B. Keita, 1976, Annexes de M. Brouwers & M. Raunet, 1976. Etude morphopédologique du plateau Mandingue (Cercle de Kita et Région de Faladie) au 1/200.000 en vue de son développement agricole. Rapport Institut de Recherche agro-économique Tropicale et des Cultures Vivrières (IRAT), République du Mali.
- Cissé, S. & P.A. Gosseye (eds), 1990, Compétition pour les ressources limitées : le cas de la cinquième région du Mali. Rapport 1. Ressources naturelles et population. CABO. Wageningen, Pays-Bas, ESPR, Mopti, Mali. 106 p, 66p annexes.
- CMDT/IER/DRSPR, 1990, Memento techniques culturelles. A l'usage des agents d'encadrement agricole. KIT publications. Amsterdam. 123 p.
- Doorenbos, J. & A.H. Kassam, 1979, Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. FAO, Rome, 193 p.

- Driessen, P.M., 1986, The water balance of the soil. Chap. 3.2 dans : Modelling of agricultural production : weather, soils and crops. (Van Keulen & Wolf eds.) p. 76-112.
- 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. 266 p.
- 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.
- Erenstein, O., 1990, Simulation of water-limited yields of sorghum, millet and cowpea for the 5th Region of Mali in the framework of quantitative land evaluation. Wageningen Agricultural University, Dept. of Theoretical Production Ecology, 60 pp. + 190 annex.
- FAO/UNESCO, 1974-1981, Soil map of the world 1 :1 M. Vol. I-X, FAO-Rome, Italy, UNESCO, Paris, France.
- Feller, C.E. Fritsch, R. Poss & C. Valentin, 1991, Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). Dans : Cahiers, ORSTOM, série Pédologie, vol XXVI, n°1, 1991, p.25-36.
- Goudriaan, J., 1977, Crop micrometeorology : a simulation study. Simulation monograph. Pudoc, Wageningen, 257 p.
- 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
- Hijkoop, J., J. v.d. Poel & B. Kaya, 1991, Une lutte de longue haleine...., Aménagements anti-érosifs et gestion de terroir. Systèmes de production rurales au Mali : volume 2. Institut d'Economie Rurale (IER), Bamako, Mali ; Institut Royale des Tropiques (KIT), Amsterdam. 154 p.
- Hoogmoed, W.B & L. Stroosnijder, 1984, Crust formation on sandy soils in the Sahel. I. Rainfall and infiltration. Soil and Tillage Res. 4 : 5-25
- Jones, M.J., 1976, The significance of crop residues to the maintenance of fertility under continuous cultivation at Samaru, Nigeria. Journal of Agr. Sci. (Cambridge) 86 : 117-125.
- Keulen van H., & J. Wolf, 1986 Modelling of agricultural production : weather, soils and crops. Pudoc Wageningen 1986, Simulation Monographs, 479 p.
- 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.

Kraalingen, van D.W.G. & W. Stol, 1996, Evapotranspiration Modules for crop growth simulation. Penman, Makkink and Priestley-Taylor. AB-DLO Wageningen (in prep.)

Microsoft (1992) EXCEL 4.0 Microsoft Cooperation.

Penning de Vries, F.W.T. & M.A. Djitéye (eds), 1982, [La production des pâturages sahéliens. Une étude des sols des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle](#). Agric Reseach Reports 918. Pudoc Wageningen 525 p.

Pieri, C., 1989, Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. CIRAD/IRAT. Montpellier. 444 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.

Pol, F. van de , 1992, Soil mining. An unseen contributor to farm income in Southern Mali. Bulletin 325. Royal Tropical Institute, KIT-Amsterdam 47 p.

Purseglove, J.W., 1974, Tropical crops. Dicotyledons. Longman, London 719 p.

Purseglove, J.W., 1975, Tropical crops. Monocotyledons. Longman, London 607 p.

Ridder de N. & H. Van Keulen, 1990, Some aspects of the role of organic matter in sustainable intensified arable farming systems in Wet-African semi-arid tropics. Fert. Res. 26 : 299-310.

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 p.

Smaling, E., 1993, An agro-ecological framework for integrated nutrient management, with special reference to Kenya. PhD-thesis Wageningen Agricultural University, 250 p.

Soil Conservation Service, 1981, Soil Resource inventories and development planning ; Selected papers from the Proceedings of workshops organized by the soil resource inventory group at Cornell University.

Washington D.C., Soil Conservation service, Soil management services.

SOW (Stichting Onderzoek Wereldvoedselvoorziening), 1985, Potential food production increases from fertiliser aid. A case study of Burkina Faso, Ghana and Kenya. Centre for World Food Studies, Amsterdam-Wageningen.

Stroosnijder, L. & W.B. Hoogmoed, 1984, Crust formation on sandy soils in the Sahel. II Tillage and its effects on the water balance. *Soil and Tillage Res.* 4 : 321 - 337.

Stroosnijder, L., W.B. Hoogmoed & J.A.A. Berkhout, 1991, Modelling effects of water conservation tillage in the semi arid tropics. *Int. Symp. on 'Gestion agroclimatique des precipitations, une voie de reduction de gap technologique de l'agriculture Tropical africaine'*. Bamako, Republique de Mali.

Tanner, C.B. & T.R. Sinclair, 1983, Efficient water use in crop production. Research or Re-search ? Dans : *Limitations to efficient water use in crop production* (Taylor et al. (eds)). American Society of Agronomy. p. 1-27.

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 dans : *Neth. J. Agr. Science* 38, p. 221-238.

Verberne, E.L.J., 1992, Simulation of nitrogen and water balance in a system of grassland and soil. *IB-nota* 258. Dienst Landbouwkundig Onderzoek. Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren, 56 p.

Vierich, H.I.D. & W.A. Stoop, 1990, Changes in West African Savanna Agriculture in response to Growing Population and Continuing low rainfall. *Agriculture, ecosystems and Environment* 31 (1990) 115-132.

Vlaar, J.C.J., 1992, Les techniques de conservation des eaux et des sols dans les pays du Sahel. Rapport d'une étude effectuée dans le cadre de la collaboration entre le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Ouagadougou, Burkina Fasso, et l'Université Agronomique Wageningen (UAW), les Pays Bas. 99 p. + annexes.

Wolf. J., C.T. de Wit, B.H. Janssen & D.J. Lathwell, 1987, Modelling long-term crop response to fertiliser phosphorus I. The model. *Dans Agron. J.* 79, p. 445-451.

Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, 1960, A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. *7 th Int. Congress Soil Sc.*, Vol I, p. 418-425.

Annexes

Annexe I

Carte de la région soudano-sahélienne et distribution des types de sol

Sous-zone	Situation	Superficie km ²	Principaux substrats	%
SZ_11	Région de Kayes	22 883	Limon sableux grossier (Lisa_g) Superficiel (SU) Limon sableux fin (Lisa_f) Gravillonnaire (GR) Autres substrats	23 17 16 14 30
SZ_12	Région de Kayes	24 589	Limon limoneux (LILI) Gravillonnaire (GR) Limon sableux fin (Lisa_f) Superficiel (SU) Autres substrats	23 22 12 11 32
SZ_13	Région de Kayes	25 545	Gravillonnaire (GR) Limon limoneux (LILI) Limon sableux fin (Lisa_f) Superficiel (SU) Autres substrats	40 27 11 9 13
SZ_21	Région de Koulikoro et de Ségou	25 826	Sable Limoneux (SALI) Limon sableux fin (Lisa_f) Limon sableux grossier (Lisa-g) Gravillonnaire (GR) Autres substrats	36 30 25 6 3
SZ_22	Région de Koulikoro et de Ségou	21 752	Limon grossier (Lisa-g) Sable limoneux (SALI) Limon argileux (LIAR) Limon sableux fin (Lisa_f) Autres substrats	39 24 9 9 19
SZ_23	Région de Koulikoro	20 058	Gravillonnaire (GR) Limon sableux grossier (Lisa_g) Limon sableux fin (Lisa_f) Sableux limoneux (SALI) Autres substrats	30 26 21 11 12

SZ_24	Région de Koulikoro	13 506	Gravillonnaire (GR) Limon limoneux (LILI) Gravillonnaire superficiel (GR_su) Limon sableux fin (Lisa_f) Autres substrats	46 26 10 10 8
SZ_30	Région de Tombouctou	28 151	Limon sableux grossier (Lisa-g) Sable (SA) Limon limoneux (SALI) Limon sableux fin (Lisa_f) Autres substrats	22 20 18 13 27
SZ_31	Région de Gao et de Tombouctou	45 875	Sable (SA) Limon sableux fin (Lisa-f) Limon sableux grossier (Lisa-g) Superficiel (SU) Autres substrats	36 22 22 7 13
SZ_32	Région de Gao et de Tombouctou	60 158	Sable (SA) Limon sableux fin (Lisa-f) Limon sableux grossier (Lisa-g) Superficiel (SU) Autres substrats	48 19 13 10 10
Sous-zone	Situation	Superficie km ²	Principaux substrats	%
SZ_33	Région de Mopti	32 955	Sable limoneux (SALI) Gravillonnaire (GR) Inondable (IN_h) Limon sableux fin (Lisa-f) Autres substrats	20 18 12 11 39
SZ_34	Région de Mopti et Ségou	32 524	Ecoulement (EC) Limon sableux grossier (Lisa-g) Limon sableux fin (Lisa-f) Gravillonnaire (GR) Autres substrats	22 17 16 15 30
SZ_35	Région de Mopti et de Ségou	23 955	Sable Limoneux fin (Lisa-f) Ecoulement (EC) Limon argileux (LIAR) Gravillonnaire (GR) Autres substrats	24 20 12 9 35

SZ_36	Région de Ségou	18 027	Gravillonnaire (GR)	23
			Limon argileux (LIAR)	18
			Gravillonnaire superficiel (GR_su)	17
			Limon sableux fin (Lisa_f)	15
			Autres substrats	27
SZ_37	Région de Sikasso	14 709	Gravillonnaire superficiel (GR_su)	25
			Gravillonnaire (GR)	31
			Limon argileux (LIAR)	24
			Limon limoneux (LILI)	12
			Autres substrats	8

Répartition des superficies des régions administratives sur les sous-zones ; a) en 100 km² ; b) en %

Région administrative	Sous-zone															Totale dans zone
	11	12	13	21	22	23	24	30	31	32	33	34	35	36	37	
a)																
Kayes	239	253	265	4	10	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	777
Koulikoro	3	5	9	136	109	143	130	0	0	0	0	0	0	7	3	545
Tombouctou	0	0	0	4	0	0	0	307	243	259	21	0	0	0	0	834
Gao	0	0	0	0	0	0	0	0	391	486	0	0	0	0	0	877
Mopti	0	0	0	0	15	0	0	5	0	21	342	329	66	0	0	777
Ségou	0	0	0	69	69	65	6	0	0	0	9	28	173	181	9	609
Sikasso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	136	142
totale	242	257	274	214	202	215	136	311	633	766	372	356	239	194	148	4559
b)																
Kayes	99	98	97	2	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Koulikoro	1	2	3	64	54	67	96	0	0	0	0	0	0	4	2	
Tombouctou	0	0	0	2	0	0	0	99	38	34	6	0	0	0	0	
Gao	0	0	0	0	0	0	0	0	62	63	0	0	0	0	0	
Mopti	0	0	0	0	7	0	0	1	0	3	92	92	28	0	0	
Ségou	0	0	0	32	34	30	4	0	0	0	2	8	72	93	6	
Sikasso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	92	
totale	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

Annexe II

Transformation sol-FAO/UNESCO en sol-PIRT

Participation (%) des substrats PIRT dans les substrats de FAO/UNESCO pour les sous-zones 31 et 32								
Substrats PIRT	Substrats FAO/UNESCO							
	Bv7-a	I-Re-b	Re35-1a	Qc1	Q11	Q16-1a	Q110	Q111-1a
D1	-	-	6	-	-	24	-	11
D3	16	-	14	41	32	31	19	7
D4	20	-	19	50	44	2	34	-
DA1	-	-	-	-	-	-	-	4
DA2	3	-	11	7	24	6	14	1
DA3	-	-	2	-	-	8	2	3
PA3	61	-	-	-	-	-	-	-
PL1	-	-	17	1	-	18	-	18
PL3	-	-	-	-	-	-	-	5
PL4	-	-	-	-	-	-	6	-
PL9	-	8	-	-	-	-	-	-
PS1	-	-	-	-	-	-	6	-
PS3	-	8	-	-	-	-	-	-
TC1	-	-	2	-	-	-	11	-
TC2	-	8	-	-	-	-	4	-
TH1	-	-	4	-	-	-	-	1
TR1	-	-	4	-	-	8	-	12
TR2	-	29	-	-	-	-	-	-
X2	-	-	7	-	-	-	-	3
X3	-	-	11	1	-	2	4	36
X4	-	-	-	-	-	-	-	-
X5	-	48	2	-	-	-	-	-

Abbreviations pour les substrats FAO/UNESCO

Bv Vertic Cambisols

I Lithosols

Re Eutric Regosols

Qc Cambic Arenosols

Ql Luvic Arenosols

Annexe III

Stations pluviométriques

Tableau 3.5.1. Données caractéristiques des stations pluviométriques au Mali. Long., Lat. : longitude et latitude (en degrés) de la station ; Nbre an : nombre d'années pour lesquelles les données sont disponibles et pluviosité annuelle moyenne (mm).

		pluviométrie mensuelle (mm)										
code	station	long.	lat.	nbre an	avr.	mai	juin	juil	août	sep.	oct.	total
19	Bourem	-0,3	19,9	23	0	3	15	32	41	15	3	111
20	Gourma Rharous	-1,9	16,8	26	1	2	10	33	49	23	2	122
21	Tombouctou	-3,0	16,7	30	1	4	14	45	63	27	2	159
23	Goundam	-3,6	16,3	26	0	5	9	48	67	29	6	169
24	Dire	-3,4	16,2	23	1	7	18	60	79	30	4	204
25	Gao	-0,0	16,3	29	2	5	22	56	69	28	3	188
29	Menaka	2,2	15,9	30	1	6	23	68	83	28	4	218
31	Ansongo	0,5	15,6	10	0	8	19	72	116	44	6	269
34	Bambara Maoudé	-2,7	15,9	22	3	5	26	71	95	46	4	253
36	Hombori	-1,7	15,2	29	2	8	37	103	109	57	12	333
38	Nioro	-9,6	15,2	30	2	7	46	132	148	92	26	458
39	Ouatagouna	0,7	15,1	19	2	9	25	74	97	47	5	262
40	Nara	-7,2	15,1	22	3	9	43	113	139	65	11	390
42	Yelimane	-10,5	15,1	24	1	9	51	140	158	107	19	488
45	Douentza	-2,9	15,0	17	5	23	54	116	147	89	20	457
50	Dioura	-5,2	14,8	19	7	10	39	94	116	65	8	345
52	Sokolo	-6,1	14,7	27	2	7	41	114	156	68	12	406
54	Sandare	-10,3	14,7	23	3	9	86	187	196	117	31	633
59	Diema	-9,1	14,5	19	3	13	76	180	205	99	20	599
60	Mopti	-4,1	14,3	28	4	23	56	127	155	80	18	466

61	Mourdiah	-7,4	14,4	22	4	15	46	136	149	61	10	426
63	Kayes	-11,4	14,4	30	0	11	82	169	198	131	36	632
64	Bandiagara	-3,6	14,3	26	6	16	62	122	158	81	17	467
67	Niono	-5,9	14,2	23	5	25	58	130	183	78	17	502
71	Diamou	-11,2	14,0	20	0	21	87	192	217	133	40	696
73	Bankass	-3,5	14,0	30	7	22	62	147	167	90	21	524
79	Djenne	-4,5	13,9	27	6	33	73	135	167	82	16	521
84	Bafoulabe	-10,8	13,8	23	0	21	101	192	265	164	48	794
89	Kolokani	-8,0	13,5	28	9	31	91	178	222	142	41	722
90	Banamba	-7,4	13,5	29	7	29	85	169	203	121	38	660
96	Segou	-6,1	13,4	29	11	32	71	160	210	116	25	634
100	San	-4,9	13,3	29	16	35	89	177	212	133	26	696
105	Cinzana	-5,9	13,2	25	14	31	97	165	194	114	30	650
107	Kita	-9,4	13,0	26	12	40	141	205	282	188	64	940
144	Koutiala	-5,4	12,4	30	23	65	125	218	241	165	45	896
145	Yorosso	-4,7	12,3	25	24	70	104	206	225	158	54	858
162	Bougouni	-7,5	11,4	30	45	100	146	246	283	206	72	1117
165	Sikasso	-5,6	11,3	30	45	94	152	235	298	193	72	1122

Tableau 3.5.2. Stations utilisées pour le calcul de la pluviosité moyenne par sous-zone : Pour le calcul de pluviosité moyenne, les pluviosités des stations principales ont été considérées en entier (poids 1) et celles des stations secondaires ont été considérées de moitié (poids 0,5).

Sous-zone	stations principales	stations secondaires
11	42, 38	
12	54, 59, 63	
13	71, 84	89
21	40	38, 50
22	52, 61, 67	
23		61, 67, 89
24		107
30	21, 23, 24	34
31	20, 25	

32	29, 31, 34, 39	
33	36, 45	50
34	50, 60, 64, 73	
35	79, 96	67, 100
36	100, 105, 144	
37	144, 145	

Annexe IV Coefficients cultureaux

[Annexe IV-2](#), [Annexe IV-3](#), [Annexe IV-4](#), [Annexe IV-5](#), [Annexe IV-6](#), [Annexe IV-7](#), [Annexe IV-8](#), [Annexe IV-9](#),

[Annexe IV-10](#), [Annexe IV-11](#), [Annexe IV-12](#), [Annexe IV-13](#), [Annexe IV-14](#), [Annexe IV-15](#), [Annexe IV-16](#),

[Annexe IV-17](#), [Annexe IV-18](#), [Annexe IV-19](#), [Annexe IV-20](#), [Annexe IV-21](#), [Annexe IV-22](#)

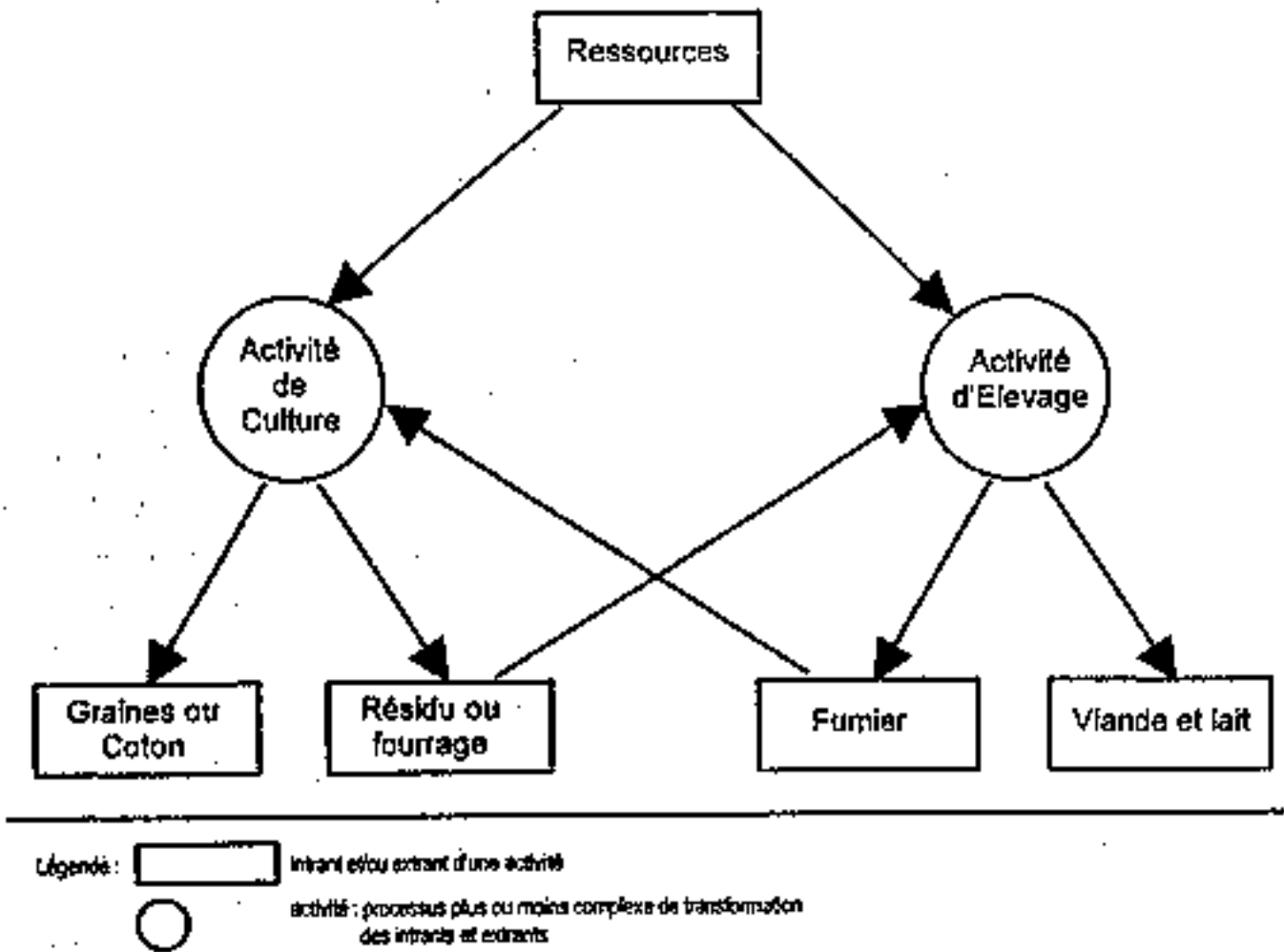


Figure 2.1. Diagramme relationnel des activités de culture et d'élevage, en ce qui concerne leur compétition pour les mêmes ressources et leur interaction à travers les sous-produits.

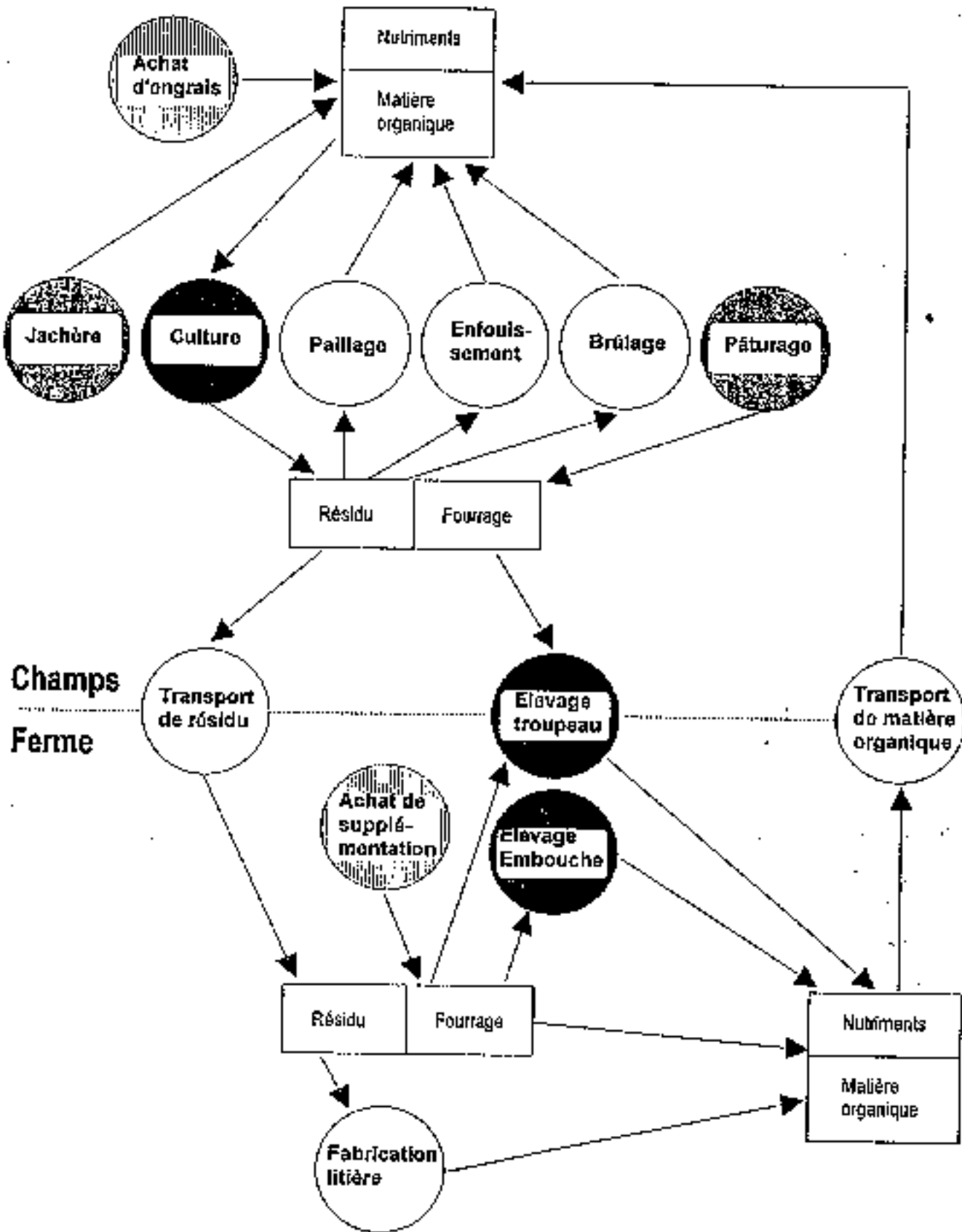


Figure 2.2. Diagramme relationnel des activités de production et de leurs sous-produits.

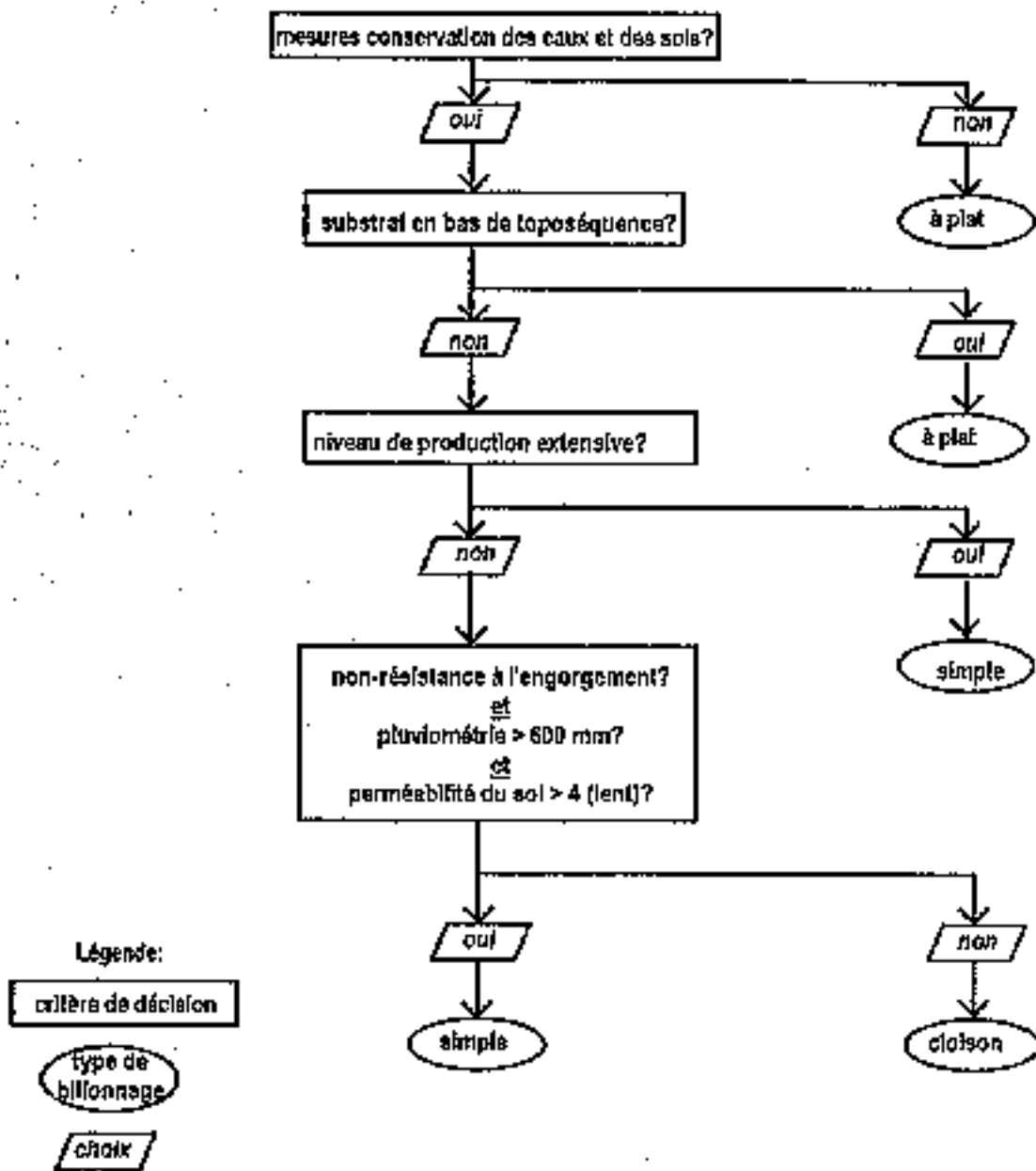


Figure 4.1. Diagramme décisionnel utilisé pour l'évaluation des mesures de conservation des eaux et des sols.

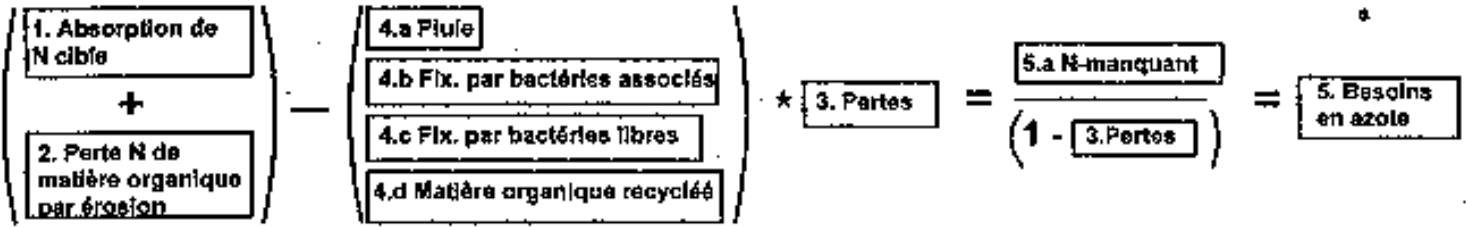


Figure 5.1. Procédure de calcul schématisé de l'intrant N dans les activités culturales.
Les nombres se réfèrent aux étapes de la procédure présentée au tableau 5.3.

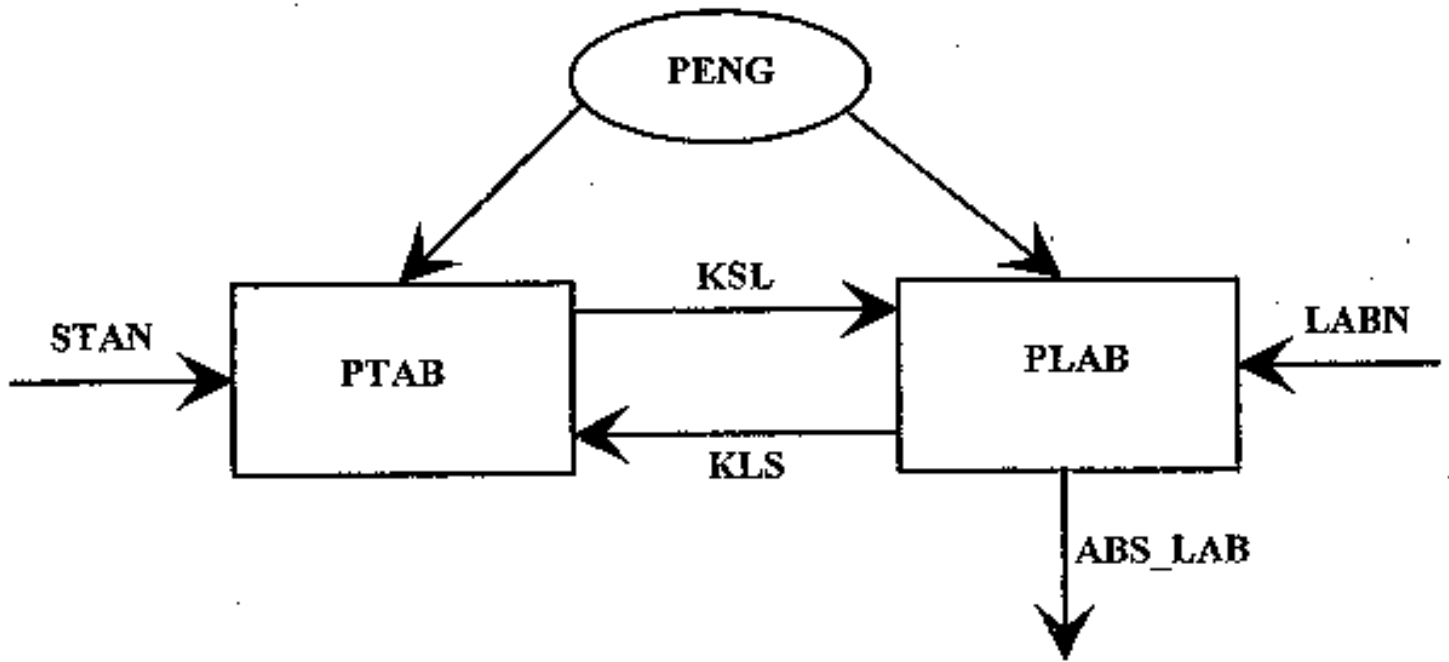
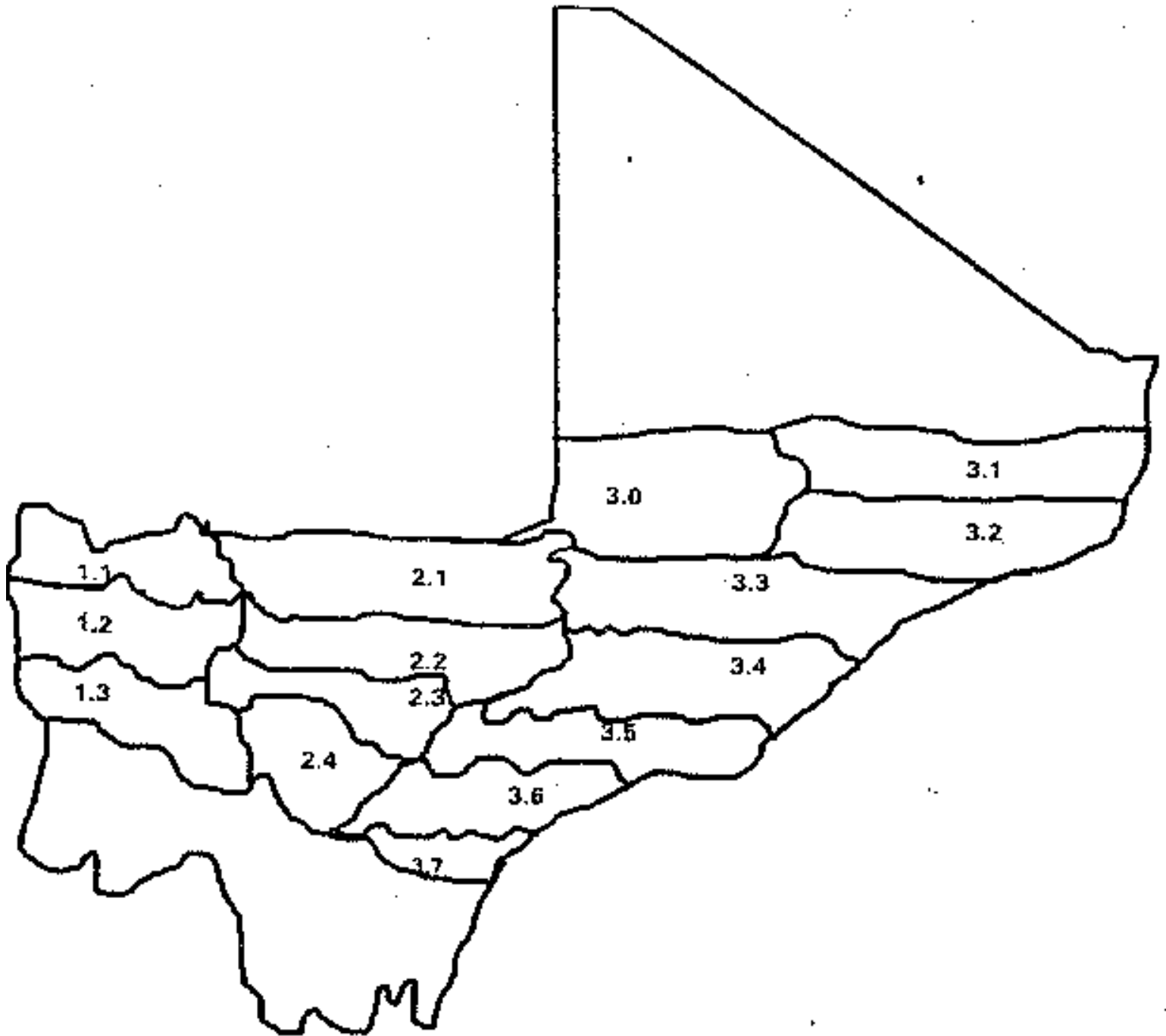


Figure 5.2. Structure du modèle utilisé pour le P. Voir le texte pour les explications et les abréviations.

ANNEXE I Carte de la région soudano-sahélienne et distribution des types de sol



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAUX DE PRODUCTION																														
2																															
3	cultures:																														
4	dans tous semi semi tous semi semi tous semi semi tous semi semi tous semi semi tous semi semi tous semi semi																														
5	unité: le texte: niveaux extensif extensif intensif intensif niveaux extensif extensif intensif intensif niveaux extensif extensif intensif intensif niveaux extensif extensif intensif intensif niveaux extensif extensif intensif intensif																														
6																															
7	type de culture																														
8																															
9	REPARTITION DES PERIODES DE L'ANNEE																														
10	Durée de croissance																														
11	minimale par. 4.1.2 65 90 90 70 70																														
12	maximale 120 135 150 120 120																														
13																															
14	Début de la croissance																														
15	Fin de la croissance																														
16																															
17	Nombre de jours absolu sect. 5.3																														
18	Amendements Matière Organique 20 20 20 20 20																														
19	Préparation 10 7 7 7 7																														
20	Semis 2 2 2 2 2																														
21	Entretien-1 10 10 10 5 5																														
22	Entretien-2 0 0 0 0 0																														
23	Récolte 7 7 7 7 21																														
24	Hors récolte 20 20 20 20 20																														
25	Reste 0 0 0 0 0																														
26																															
27	Fraction de la saison pluvieuse																														
28	Amendements Matière Organique 0 0 0 0 0																														
29	Préparation 0,05 0,05 0,05 0,05 0,05																														
30	Semis 0,02 0,02 0,02 0,02 0,02																														
31	Entretien-1 0,02 0,02 0,02 0,02 0,02																														
32	Entretien-2 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00																														
33	Récolte 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00																														
34	Hors récolte 0 0 0 0 0																														
35	Reste 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00																														
36																															
37	Période de récolte																														
38	dans ou hors saison agricole HS HS HS DS DS																														
39																															
40	TEMPS DE TRAVAUX sect. 5.3																														
41	Amendement Matière Organique																														
42	épannage pailis (1) kg/ 400 400 400 400 400																														
43	épannage fumier (1) kg/ 400 400 400 400 400																														
44																															
45	Préparation																														
46	arrachage des résidus kg/ 400 400 400 400 400																														
47	grillage hy/ha 5 4 4 4 5 4 4 4 5 4 4 4 5 4 4 4 5 4 4 4 5 4 4 4 5 4 4 4																														
48	houage hy/ha 5																														
49	bllonnage à la main hy/ha 25																														
50	bilions cloisonnés hy/ha 10																														
51	labour de sol à plat (1) hy/ha 8																														
52	labour de sol aux bilions (1) hy/ha 4																														
53	nivellement hy/ha																														

A		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE						
1 VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAUX DE PRODUCTION																																					
2																																					
3 cultures:																																					
4		MIL				SORGHO					MAIS					ARACHIDE					NIEBE																
5		dans		le texte:		tous		semi		semi		tous		semi		semi		tous		semi		semi		tous		semi		semi									
6		niveau		extensif		extensif		intensif		intensif		niveau		extensif		extensif		intensif		intensif		niveau		extensif		extensif		intensif		intensif							
54	herbage	h/ha							6						6											6											
55	préparation des semences	h/ha																								6											
56	pépinière	h/ha																							6,5	6,5	6,5	6,5									
57	épandage fumier(2)	kg/j																																			
58	épandage litbre(2)	kg/j																																			
59	épandage pailles (2)	kg/j																																			
60	épandage engrais (1)	h/ha			0	0	1	1				0	0	1	1			0	0	1	1			0	1	1	1			0	1	1	1				
61	irrigation (1)	h/ha			0,75	0,75	1,5	3				0,75	0,75	1,5	3			0,75	0,75	1,5	3			0,75	0,75	1,5	3			0,75	0,75	1,5	3				
62	additionnel(1)	h/ha																																			
63		h/ha																																			
64	Semis																																				
65	semis manuel	h/ha			5	5	5	5				5	5	5	5			5	5	5	5			11	11	11	11			5	5	5	5				
66	semis au semoir	h/ha																																			
67	repicage	h/ha					2	2					2	2	2				2	2	2					4	4							2			
68	irrigation (2)	h/ha																																			
69	additionnel(2)	h/ha			0,25	0,25	0,5	1				0,25	0,25	0,5	1			0,25	0,25	0,5	1			0,25	0,25	0,5	1			0,25	0,25	0,5	1				
70		h/ha																																			
71	Entretien-1																																				
72	herbage (2)	h/ha																																			
73	démariage	h/ha																																			
74	épandage engrais (2)	h/ha			7	7	7	7																													
75	sarcage manuel (1)	h/ha			0	4	4	4				0	4	4	4			0	4	4	4			0	4	4	4			0	4	4	4				
76	sarcage à traction animale (1)	h/ha			15	15	15	15				15	15	15	15			15	15	15	15			15	15	15	15			15	15	15	15				
77	pulvérisation (1)	h/ha																																			
78	irrigation (3)	h/ha			0	0	0	0,5				0	0	0	0,5			0	0	0	0,5	0,5			0	0	0,5	1			0	0	0,5	1			
79	additionnel(3)	h/ha			0,5	0,5	1	2				0,5	0,5	1	2			0,5	0,5	1	2			0,5	0,5	1	2			0,5	0,5	1	2				
80		h/ha																																			
81	Entretien-2																																				
82	épandage engrais (3)	h/ha			0	0	0	4				0	0	0	4			0	0	0	4			0	0	0	4			0	0	0	4				
83	sarcage/dés herbage (2)	h/ha			12	12	12	12				12	12	12	12			12	12	12	12			12	12	12	12			12	12	12	12				
84	sarcage/dés herbage (3)	h/ha																																			
85	pulvérisation (2)	h/ha																																			
86	expulsion des oiseaux (1)	h/ha			0	0	0	0,5				0	0	0	0,5			0	0	0	0,5	0,5			0	0	0	0,5			0	0	0	0,5			
87	irrigation (4)	h/ha			2,0	2,0	6,0	8,0				2,0	2,0	6,0	8,0			2,0	2,0	6,0	8,0			2,0	2,0	6,0	8,0			2,0	2,0	6,0	8,0				
88	additionnel(4)	h/ha			1,0	1,0	2,0	4,0				1,0	1,0	2,0	4,0			1,0	1,0	2,0	4,0			1,0	1,0	2,0	4,0			1,0	1,0	2,0	4,0				
89		h/ha																																			
90	Récolte																																				
91	expulsion des oiseaux (2)	h/ha			1	1	3	4				1	1	3	4			0	0	1	1																
92	récolte produit 1	kg/jour			100	100	130	160				100	100	130	160			160	160	190	210			40	40	45	50			40	40	45	50				
93	récolte produit 2 (1)	kg/jour																																			
94	additionnel(5)	h/ha																																			
95		h/ha																																			
96	Hors récolte																																				
97	préparation de la paille	kg/jour			400							400						400						400						400							
98	labour du sol pour l'enfouissement	h/ha																																			
99	labour de fin cycle	h/ha																																			
100		h/ha																																			
101	Rest																																				

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE		
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAUX DE PRODUCTION																																
2																																	
3	cultures:		MIL							SORGHO						MAIS						ARACHIDE						NIEBE					
4		dans	tous	semi	semi					tous	semi	semi			tous	semi	semi				tous	semi	semi			tous	semi	semi					
5		unité:	le texte:	niveaux	extensif	intensif	intensif	intensif		niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif		niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif			
102	récolte produit 2 (2)	kg/jour		400						400					400						400						400						
103	entretien des digues/canaux	hj/ha			5	5	10	25			5	5	10	25		5	5	10	25			5	5	10	25			5	5	10			
104	nettoyage	hj/ha			5	1	1	1			5	1	1	1		5	1	1	1			5	1	1	1			5	1	1			
105	additionnel	hj/ha																															
106																																	
107	Tout																																
108	battage/vannage	kg/jour		50						75					100						90							75					
109	irrigation	hj/ha																															
110	gardiennage	hj/ha																															
111	distribution de la paille	kg/jour		400						400					400						400							400					
112																																	
113	TEMPS D'ATTELAGE		sect. 5.4																														
114	Préparation																																
115	gratage	hj/ha				2	2	2			2	2	2					2	2	2													
116	houage	hj/ha																															
117	labour de sol à plat (1)	hj/ha				4	4	4			4	4	4					4	4	4								4	4	4			
118	labour de sol aux billons (1)	hj/ha				2	2	2			2	2	2					2	2	2								2	2	2			
119	nivèlement	hj/ha																															
120	hersage	hj/ha						3						3																			
121																																	
122	Semis																																
123	semis	hj/ha					1	1					1	1						1	1								2	2			
124																																	
125	Entretien-1																																
126	hersage (2)																																
127	sarclage/désherbage (1)	hj/ha					2	2	2			2	2	2					2	2	2							2	2	2			
128																																	
129	Entretien-2																																
130	sarclage/désherbage (2)	hj/ha																															
131																																	
132	Hors récolte																																
133	labour du sol pour l'enfouissement	hj/ha																				4							4				
134	labour de fin cycle	hj/ha																															
135																																	
136	INTRANTS CONSOMMABLES		sect. 5.5																														
137	semences	kg/ha			10	10	10	10			10	10	10	10					25	25	25	25			100	100	100	100			20	20	20
138	pesticides de semis (chlorothalonil 25 % m.a.)	kg/kg					0,001	0,001					0,001	0,001															0,001	0,001			0,001
139	pesticides	l/ha			0	0	0	6			0	0	0	6					0	0	3	6						3	9			9	
140																																	
141	AUTRES COÛTS		sect. 5.5																														
142	redevance	FCFA																															
143	battage mécanisé	FCFA/kg																															
144	décorticage mécanisé	FCFA/kg																															
145																																	
146	TAUX MINIMAUX DES ELEMENTS NUTRITIFS		sect. 5.2																														
147	Azote																																
148	grain	g/kg			13,0						10,9																						
149	reste infructueuse	g/kg			3,0						2,5																						

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE									
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAUX DE PRODUCTION																																							
2																																								
3	cultures:																																							
4		MIL					SORGHO					MAIS					ARACHIDE					NIEBE																		
5		dans	tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi											
6		unité:	le texte:	niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif		niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif											
150	feuilles	g/kg		5,5						5,5					5,5								15																	
151	tiges	g/kg		2,0						2,0					2,0								15																	
152	racines	g/kg		3,0						2,5					4,5								11,6																	
153																																								
154	Phosphore																																							
155	grain	g/kg		1,8						1,3					1,6								2,2																	
156	reste infructescence	g/kg		0,3						0,2					0,2								0,4																	
157	feuilles	g/kg		0,25						0,25					0,25								1																	
158	tiges	g/kg		0,25						0,25					0,25								1																	
159	racines	g/kg		0,3						0,2					0,2								1																	
160																																								
161	Potassium																																							
162	grain	g/kg		3,0						2,5					2,5								6																	
163	reste infructescence	g/kg		10,0						6					8								4																	
164	feuilles	g/kg		10,0						6					8								7																	
165	tiges	g/kg		10,0						6					8								7																	
166	racines	g/kg		10,0						6					8								7																	
167																							3,4																	
168	facteurs de correction																																							
169	grain				1,2	1,2	1,2	1,4			1,2	1,2	1,2	1,4			1,2	1,2	1,2	1,4			1,2	1,2	1,2	1,4						1,2	1,2	1,2						
170	reste fruit				1,2	1,2	1,2	1,4			1,2	1,2	1,2	1,4			1,2	1,2	1,2	1,4			1,2	1,2	1,2	1,4						1,2	1,2	1,2						
171	feuilles				1,3	1,3	1,3	1,7			1,3	1,3	1,3	1,7			1,3	1,3	1,3	1,7			1,3	1,3	1,3	1,7						1,3	1,3	1,3						
172	tiges				1,3	1,3	1,3	1,7			1,3	1,3	1,3	1,7			1,3	1,3	1,3	1,7			1,3	1,3	1,3	1,7						1,3	1,3	1,3						
173	racines				1,3	1,3	1,3	1,7			1,3	1,3	1,3	1,7			1,3	1,3	1,3	1,7			1,3	1,3	1,3	1,7						1,3	1,3	1,3						
174					1,3	1,3	1,3	1,7			1,3	1,3	1,3	1,7			1,3	1,3	1,3	1,7			1,3	1,3	1,3	1,7						1,3	1,3	1,3						
175	fraction d'azote fixé			0						0																														
176																							0,75										0,75							
177	CARACTERISTIQUES BOTANIQUES																																							
178	résistance à l'engorgement (oui,non)		chap. 4	non						oui					non								non																	
179	profondeur effective maximales des racines	m		1,5						1,25					1								0,75																	
180																																								
181	Pour calcul rendement niveau intensif																																							
182	b (Tanner and Sinclair)		par. 4.1.4	0,75						0,75					0,75								0,6																	
183	c (Tanner and Sinclair)			0,7						0,7					0,7								0,3																	
184	quotient ETA/ETP ou rendement commence à baisser			0,25						0,35					0,5								0,35																	
185	durée de la période sans couverture du sol complet	jour		30						30					30								40																	
186	fraction du rendement limité par l'eau à atteindre			0,8						0,8					0,8								0,8																	
187	fraction perdue par des pertes inévitables			0,2						0,2					0,2								0,2																	
188																																								
189	Pour calcul rendement niveau extensif																																							
190	Relation eau infiltrée et rendement			5						5					5								3																	
191																																								
192	Rendements non-calculés																																							
193																																								
194	Répartition des parties des plantes																																							
195	ratio production aérienne/souterraine		sect. 4.3																																					
196	relation infructescence/production aérienne			4	4	5	6			4	4	5	6		4	4	5	6				4	4	5	6						4	4	5							
197	relation grain/infructescence			0,4	0,4	0,45	0,5			0,4	0,4	0,45	0,5		0,45	0,45	0,5	0,55				0,4	0,4	0,45	0,5						0,35	0,35	0,4							
				0,5	0,5	0,55	0,6			0,65	0,65	0,7	0,75		0,8	0,8	0,85	0,9				0,65	0,65	0,7	0,75						0,75	0,75	0,8							

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE		
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAUX DE PRODUCTION																																
2																																	
3	cultures:			MIL					SORGHO					MAIS					ARACHIDE					NIEBE									
4		dans	tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi				
5		unité:	le texte:	niveaux	extensif	extensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif		
198	relation	feuille/paille		0,35				0,35							0,45								0,7					0,6					
199																																	
200	COMPOSITION DES PARTIES DES PLANTES																																
201	sect. 5.1																																
201	DPM																																
202	grain			0,11				0,21							0,13							0,42						0,42					
203	reste infructescence			0,11				0,21							0,13							0,42						0,42					
204	feuilles			0,11				0,21							0,13							0,42						0,42					
205	tiges			0,11				0,21							0,13							0,42						0,42					
206	racines			0,11				0,21							0,13							0,42						0,42					
207																																	
208	SPM																																
209	grain			0,77				0,72							0,79							0,47						0,49					
210	reste infructescence			0,77				0,72							0,79							0,47						0,49					
211	feuilles			0,77				0,72							0,79							0,47						0,49					
212	tiges			0,77				0,72							0,79							0,47						0,49					
213	racines			0,77				0,72							0,79							0,47						0,49					
214																																	
215	RPM																																
216	grain			0,12				0,08							0,09							0,11						0,09					
217	reste infructescence			0,12				0,08							0,09							0,11						0,09					
218	feuilles			0,12				0,08							0,09							0,11						0,09					
219	tiges			0,12				0,08							0,09							0,11						0,09					
220	racines			0,12				0,08							0,09							0,11						0,09					
221																																	
222	Possibilité de fourrage			oui						oui						oui						oui						oui					
223																																	
224	CARACTERISTIQUES DE CULTURE																																
225	sect. 6.3																																
225	Formule de Wischmeier:																																
226	érosivité de la technique culturale			0,65	0,6	0,5	0,4			0,65	0,6	0,5	0,4			0,65	0,6	0,5	0,4			0,7	0,6	0,5	0,4			0,3	0,2	0,1			
227																																	
228	UTILISATION DES PRODUITS																																
229	chap. 7																																
229	Stratégie d'utilisation des résidus:																																
230	libre (les résidus peuvent être utilisés pour l'enfouissement, le brûlage ou le transport à la ferme)			oui						oui						oui						oui						oui					
231	paillis			oui						oui						oui						non						non					
232																																	
233																																	
234	Répartition des composants des cultures:																																
235	Produit principal																																
236	grain				1	1					1	1				1	1					1						1					
237	reste infructescence				0	0					0	0				0	0					0						0					
238	feuille				0	0					0	0				0	0					0						0					
239	tige				0	0					0	0				0	0					0						0					
240	racine				0	0					0	0				0	0					0						0					
241																																	
242	Résidus à la ferme																																
243	grain				0	0					0	0				0	0					0						0					
244	reste infructescence				1	1					1	1				1	1					1						1					
245	feuille				0	0					0	0				0	0					0						0					

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE						
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAUX DE PRODUCTION																																				
2																																					
3	cultures:																																				
4			MIL				SORGHO					MAIS					ARACHIDE					NIEBE															
5		unité:	le texte:	niveaux:	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux:	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux:	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux:	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux:	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux:	extensif	extensif	intensif	intensif				
246	lige				0	0					0	0				0	0																				
247	racine				0	0					0	0				0	0																				
248																																					
249	Résidu au champ 1																																				
250	grain																																				
251	reste infrutescence				0	0					0	0				0	0																				
252	feuille				0	0					0	0				0	0																				
253	tige				1	0					1	0				1	0																				
254	racine				0	0					0	0				0	0																				
255					0	0					0	0				0	0																				
256	Résidu au champ 2																																				
257	grain				0	0					0	0				0	0																				
258	reste infrutescence				0	0					0	0				0	0																				
259	feuille				0	0					0	0				0	0																				
260	tige				1	0					1	0				1	0																				
261	racine				0	0					0	0				0	0																				
262					0	0					0	0				0	0																				
263	Laisé au place																																				
264	grain				0	0					0	0				0	0																				
265	reste infrutescence				0	0					0	0				0	0																				
266	feuille				0	0					0	0				0	0																				
267	tige				0	0					0	0				0	0																				
268	racine				1	1					1	1				1	1																				
269																																					
270	Pailis																																				
271	grain				0	0					0	0				0	0																				
272	reste infrutescence				0	0					0	0				0	0																				
273	feuille				0	1					0	1				0	1																				
274	tige				0	1					0	1				0	1																				
275	racine				0	0					0	0				0	0																				
276					0	0					0	0				0	0																				
277	PRODUITS ET OPERATIONS																																				
278	(données pour le calcul du temps de transport)																																				
279	Récolte 1																																				
280	grain																																				
281	reste infrutescence				1	1					1	1				1	1																				
282	feuille				1	1					1	1				1	1																				
283	tige				0	0					0	0				0	0																				
284	racine				0	0					0	0				0	0																				
285					0	0					0	0				0	0																				
286	Récolte 2																																				
287	grain				0	0					0	0				0	0																				
288	reste infrutescence				0	0					0	0				0	0																				
289	feuille				0	1					0	1				0	1																				
290	tige				0	1					0	1				0	1																				
291	racine				0	1					0	1				0	1																				
292					0	0					0	0				0	0																				
293	PRODUITS TRANSPORTES																																				

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE			
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAUX DE PRODUCTION																																	
2																																		
3	cultures:		MIL				SORGHO					MAIS					ARACHIDE					NIEBE												
4		dans	tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi		tous	semi	semi					
5		unité:	le texte:	niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif		niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif	niveaux	extensif	extensif	intensif	intensif
294	produit 1:	kg/ha																																
295	grain			1	1					1	1						1	1					1										1	
296	reste infrutescence			1	1					1	1						1	1					1										1	
297	feuille			0	0					0	0						0	0					0										0	
298	tige			0	0					0	0						0	0					0										0	
299	racine			0	0					0	0						0	0					0										0	
300																																		
301	densité du produit 1	kg/m3		400						600						500							200								300			
302	poids réel/poids sec			1						1						1							1								1			
303																																		
304	produit 2																																	
305	grain			0	0					0	0						0	0					0										0	
306	reste infrutescence			0	0					0	0						0	0					0										0	
307	feuille			1	0					0	1						0	1					0										0	
308	tige			1	0					0	1						0	1					0										0	
309	racine			0	0					0	0						0	0					0										0	
310																																		
311	densité du produit 2	kg/m3		100						100						100							100								100			
312	poids réel/poids sec			1						1						1							1								1			
313																																		
314	fumier:																																	
315	densité du fumier	kg/m3		250						250						250							250								250			
316	poids réel/poids sec			2						2						2							2								2			
317																																		
318	activités de transformation possibles:																																	
319	fourrage au champ			oui						oui						oui						oui								non				
320	transport des résidus à la ferme			oui						oui						oui						oui								oui				
321	brûlage des résidus			oui						oui						oui						oui								non				
322	enfouissement des résidus			oui						oui						oui						oui								non				
323	fabrication de litière			oui						oui						oui						oui								non				
324	fourrage à la ferme			oui						oui						oui						oui								oui				
325																																		

	A	B	C	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																																		
2																																			
3	cultures:								NIEBE																										
4					COTON			FOURRAGER			STYLOSANTHES			ANDROPOGON			ANDROPOGON REPOUSSE			PATURAGE		SYLVICULTURE		JACHERE											
5		unite:	le texte:	intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux	semi intensif	tous niveaux
6																																			
7	type de culture					pluv				pluv				pluv																					
8																																			
9	REPARTITION DES PERIODES DE L'ANNEE																																		
10	Durée de croissance																																		
11	minimale				par. 4.1.2		120			85				60																					
12	maximale						180			120				200																					
13																																			
14	Début de la croissance						pluv			pluv				pluv																					
15	Fin de la croissance						pluv			pluv				pluv																					
16							pluv			pluv				pluv																					
17	Nombre de jours absolu				sect. 5.3																														
18	Amendements Matière Organique																																		
19	Préparation																																		
20	Sémis																																		
21	Entretien-1																																		
22	Entretien-2																																		
23	Récolte																																		
24	Hors récolte																																		
25	Reste																																		
26																																			
27	Fraction de la saison pluvieuse																																		
28	Amendements Matière Organique																																		
29	Préparation																																		
30	Sémis																																		
31	Entretien-1																																		
32	Entretien-2																																		
33	Récolte																																		
34	Hors récolte																																		
35	Reste																																		
36																																			
37	Période de récolte																																		
38	dans ou hors saison agricole																																		
39							HS			DS				DS																					
40	TEMPS DE TRAVAUX																																		
41	Amendement Matière Organique																																		
42	épandage pailis (1)																																		
43	épandage fumier (1)																																		
44																																			
45	Préparation																																		
46	arrachage des résidus																																		
47	grattage																																		
48	houage																																		
49	billonnage à la main																																		
50	billons cloisonnés																																		
51	labour de sol à plat (1)																																		
52	labour de sol aux billons (1)																																		
53	nivellement																																		

	A	B	C	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ		
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																																			
2				COTON						NIEBE			FOURRAGER			STYLOSANTHES			ANDROPOGON			ANDROPOGON REPOUSSE			PATURAGE		SYLVICULTURE		JACHERE							
3	cultures:			dans			tous	semi		tous	semi		tous	semi		tous	semi		tous	semi		tous	semi		tous	semi		tous	semi		tous	semi				
4				intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif			
5	unité: le texte:			intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif			
54	hersage	h/ha		6				6				6																								
55	préparation des semences	h/ha																																		
56	pépinière	h/ha																																		
57	épandage fumier(2)	kg/j																																		
58	épandage fèdre(2)	kg/j																																		
59	épandage pailis (2)	kg/j																																		
60	épandage engrais (1)	h/ha		1		1	1			1	1				1	1				1	1															
61	irrigation (1)	h/ha		3		1,5	3			1,5	3				1,5	3				1,5	3															
62	additionnel(1)	h/ha																																		
63																																				
64	Semis																																			
65	semis manuel	h/ha		5		5	5			5	5																									
66	semis au semoir	h/ha		2		2	2			2	2																									
67	repicage	h/ha																																		
68	irrigation (2)	h/ha		1		0,5	1			0,5	1																									
69	additionnel(2)	h/ha																																		
70																																				
71	Entretien-1																																			
72	hersage (2)	h/ha																																		
73	démariage	h/ha																																		
74	épandage engrais (2)	h/ha		4		4	4			4	4				4	4				4	4															
75	sarcage manuel (1)	h/ha		15		15	15			15	15																									
76	sarcage à traction animale (1)	h/ha		10		10	10			10	10																									
77	pulvérisation (1)	h/ha		0,5		0,5	0,5			0,5	0,5				0,5	0,5				0,5	0,5				0	0,5										
78	irrigation (3)	h/ha		2		1	2			1	2				1	2				1	2				1	2										
79	additionnel(3)	h/ha																																		
80																																				
81	Entretien-2																																			
82	épandage engrais (3)	h/ha		4		0	4			0	4				0	4				0	4				0	4										
83	sarcage/dés herbage (2)	h/ha		12		12	12			12	12																									
84	sarcage/dés herbage (3)	h/ha		8		8	8			8	8																									
85	pulvérisation (2)	h/ha		1,5		1	2,5			1	2,5				1	2,5				1	2,5				0	0,5										
86	expulsion des oiseaux (1)	h/ha																																		
87	irrigation (4)	h/ha		4,0		2,0	4,0			2,0	4,0				2,0	4,0				2,0	4,0				2,0	4,0										
88	additionnel(4)	h/ha																																		
89																																				
90	Récolte																																			
91	expulsion des oiseaux (2)	h/ha																																		
92	récolte produit 1	kg/jour		50		20	25			45	50				90	100				90	100				90	100										
93	récolte produit 2 (1)	kg/jour								400	400				400	400				400	400				400	400										
94	additionnel(5)	h/ha																																		
95																																				
96	Hors récolte																																			
97	préparation de la paille	kg/jour				400				400					400					400						400										
98	labour du sol pour l'ensoulement	h/ha								8																										
99	labour de fin cycle	h/ha																																		
100																																				
101	Rest																																			

	A	B	C	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ			
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																																				
2																																					
3	cultures:																																				
4	dans																																				
5	unité: le texte: intensif																																				
	COTON						FOURRAGER			STYLOSANTHES			ANDROPOGON			ANDROPOGON REPOUSSE			PATURAGE		SYLVICULTURE		JACHERE														
	tous		semi		intensif		tous	semi	intensif	tous	semi	intensif	tous	semi	intensif	tous	semi	intensif	tous	semi	intensif	tous	semi	intensif	tous	tous	tous	tous	tous	tous	tous	tous					
	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux	niveaux			
102	récolte produit 2 (2)	kg/jour				400				400					400					400																	
103	entretien des digues/canaux	h/ha		25			10	25				10	25			10	25																				
104	nettoyage	h/ha		1			1	1				1	1																								
105	additionnel	h/ha																																			
106																																					
107	Tout																																				
108	battage/vannage	kg/jour																																			
109	irrigation	h/ha																																			
110	gardienage	h/ha																																			
111	distribution de la paille	kg/jour				400				400					400																						
112																																					
113	TEMPS D'ATTELAGE																																				
114	sect. 5.4																																				
114	Préparation																																				
115	grattage	h/ha		2			2	2				2	2																								
116	houage	h/ha																																			
117	labour de sol à plat (1)	h/ha		4			4	4				4	4																								
118	labour de sol aux billons (1)	h/ha		2			2	2				2	2																								
119	nivèlement	h/ha																																			
120	hersage	h/ha		3				3					3																								
121																																					
122	Semis																																				
123	semis	h/ha		1			1	1				1	1																								
124																																					
125	Entretien-1																																				
126	hersage (2)	h/ha																																			
127	sarclage/désherbage (1)	h/ha		2			2	2				2	2																								
128																																					
129	Entretien-2																																				
130	sarclage/désherbage (2)	h/ha																																			
131																																					
132	Hors récolte																																				
133	labour du sol pour l'enfouissement	h/ha								4																											
134	labour de fin cycle	h/ha																																			
135																																					
136	INTRANTS CONSOMMABLES																																				
136	sect. 5.5																																				
137	semences	kg/ha		20			30	30				20	20			0	0			0	0			0	0												
138	pesticides de semis (chlorothalonil 25 % m.a.)	kg/kg		0,001			0,001	0,001				0,001	0,001			0,001	0,001			0	0			0	0												
139	pesticides	l/ha		12			9	18				9	18			9	18			3	6			0	0												
140																																					
141	AUTRES COUTS																																				
141	sect. 5.5																																				
142	redevance	FCFA																																			
143	battage mécanisé	FCFA/kg																																			
144	décorticage mécanisé	FCFA/kg																																			
145																																					
146	TAUX MINIMAUX DES ELEMENTS NUTRITIFS																																				
146	sect. 5.2																																				
147	Azote																																				
148	grain	g/kg				23,3				25,6				20						13,0																	
149	reste infructescence	g/kg				0				7				7							3,0																

	A	B	C	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ		
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAUX:																																			
2										NIEBE																										
3	cultures:			COTON			FOURRAGER			STYLOSANTHES			ANDROPOGON			ANDROPOGON REPOUSSE			PATURAGE			SYLVICULTURE			JACHERIE											
4				dans			tous			tous			tous			tous			tous			tous			tous											
5	unité: le texte:			intensif			niveaux			intensif			intensif			niveaux			intensif			intensif			niveaux			niveaux			niveaux					
150	feuilles	g/kg			9,7					16,8				22,4						5,5																
151	tiges	g/kg			4,9					13,2				17,6						2,0																
152	racines	g/kg			7,3					15				15						3,0																
153	Phosphore																																			
155	grain	g/kg			4,1					3				3						1,8																
156	reste infructescence	g/kg			0					0,4				0,4						0,3																
157	feuilles	g/kg			1					1				1						0,25																
158	tiges	g/kg			1					1				1						0,25																
159	racines	g/kg			0,9					1,1				1,1						0,3																
161	Potassium																																			
162	grain	g/kg			10,1					15,7				15,7						3,0																
163	reste infructescence	g/kg			0					4				4						10,0																
164	feuilles	g/kg			11,1					7				7						10,0																
165	tiges	g/kg			11,1					7				7						10,0																
166	racines	g/kg			11,1					11				11						10,0																
167																																				
168	facteurs de correction																																			
169	grain				1,4			1,2	1,4					1,2	1,4					1,2	1,4															
170	reste fruit				1,4			1,2	1,4					1,2	1,4					1,2	1,4															
171	feuilles				1,7			1,3	1,7					1,3	1,7					1,3	1,7															
172	tiges				1,7			1,3	1,7					1,3	1,7					1,3	1,7															
173	racines				1,7			1,3	1,7					1,3	1,7					1,3	1,7															
174																																				
175	fraction d'azote fixé					0				0,75				0,75						0																
176																																				
177	CARACTERISTIQUES BOTANIQUES					chap. 4																														
178	résistance à l'engorgement (oui/non)									non				non						oui																
179	profondeur effective maximales des racines					m				1,8				1,8						2							2								2	
180																																				
181	Pour calcul rendement niveau intensif					par. 4.1.4																														
182	b (Tanner and Sindair)									0,55				0,7						0,75																
183	c (Tanner and Sindair)									0,3				0,3						0,7																
184	quotient ETA/ETP où rendement commence à baisser									0,5				0,5						0,5																
185	durée de la période sans couverture du sol complet					jour				35				35						50																
186	fraction du rendement limité par l'eau à atteindre									0,8				1						1																
187	fraction perdue par des pertes inévitables									0,2				0,2						0,2																
188																																				
189	Pour calcul rendement niveau extensif																																			
190	Relation eau infiltrée et rendement									3				3						5																
191																																				
192	Rendements non-calculés																																			
193																																				
194	Répartition des parties des plantes					sect. 4.3																														
195	ratio production aérienne/souterraine									6				8	10					5	6						7	8								
196	relation infructescence/production aérienne									0,45				0,35	0,35					0,02	0,02						0	0								
197	relation grain/infructescence									0,85				0,65	0,65					0,8	0,8						0,8	0,8								

	A	B	C	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																																	
2																																		
3	cultures:																																	
4	dans																																	
5	unité: le texte: intensif																																	
198	relation feuille/paille																																	
199																																		
200	COMPOSITION DES PARTIES DES PLANTES																																	
201	DPM																																	
202	grain																																	
203	reste infrutescence																																	
204	feuilles																																	
205	tiges																																	
206	racines																																	
207																																		
208	SPM																																	
209	grain																																	
210	reste infrutescence																																	
211	feuilles																																	
212	tiges																																	
213	racines																																	
214																																		
215	RPM																																	
216	grain																																	
217	reste infrutescence																																	
218	feuilles																																	
219	tiges																																	
220	racines																																	
221																																		
222	Possibilité de fourrage																																	
223																																		
224	CARACTERISTIQUES DE CULTURE																																	
225	Formule de Wischmeier:																																	
226	érosivité de la technique culturale																																	
227																																		
228	UTILISATION DES PRODUITS																																	
229	Stratégie d'utilisation des résidus:																																	
230	libre (les résidus peuvent être utilisés pour l'enfouissement,																																	
231	le brûlage ou le transport à la ferme)																																	
232	pailis																																	
233																																		
234	Répartition des composants des cultures:																																	
235	Produit principal																																	
236	grain																																	
237	reste infrutescence																																	
238	feuille																																	
239	tige																																	
240	racine																																	
241																																		
242	Résidus à la ferme																																	
243	grain																																	
244	reste infrutescence																																	
245	feuille																																	

	A	B	C	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ			
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																																				
2										NIEBE																											
3	cultures:						COTON			FOURRAGER			STYLOSANTHES			ANDROPOGON			ANDROPOGON REPOUSSE			PATURAGE		SYLVICULTURE		JACHERE											
4			dans				tous	semi		tous	semi		tous	semi		tous	semi		tous	semi		tous	semi		tous		tous		tous								
5			unité: le texte:	intensif	niveaux	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux		niveaux		niveaux		niveaux						
246	lige						0	0		0					0				0				0														
247	racine						0	0		0					0				0				0														
248	Résidu au champ 1																																				
249	grain						0	0		0				0,35					0				0														
251	reste infructescence						0	0		0				0,35					0				0														
252	feuille						1	0		1				0,35					1				0,5														
253	tige						0	0		0				0					0				0														
254	racine						0	0		0				0					0				0														
255	Résidu au champ 2																																				
256	grain						0	0		0				0					0				0														
258	reste infructescence						0	0		0				0					0				0														
259	feuille						0	0		0				0					0				0														
260	tige						1	0		1				0,35					1				0,5														
261	racine						0	0		0				0					0				0														
262	Laisé au place																																				
263	grain						0	0		0				0,65					0				0														
265	reste infructescence						0	0		0				0,65					0				0														
266	feuille						0	0		0				0,65					0				0,5														
267	tige						0	0		0				0,65					0				0,5														
268	racine						1	1		1				1					1				1														
269	Pailles																																				
271	grain						0	0		0				0					0				0														
272	reste infructescence						0	0		0				0					0				0														
273	feuille						0	1		0				0					0				0														
274	tige						0	1		0				0					0				0														
275	racine						0	0		0				0					0				0														
276	PRODUITS ET OPERATIONS																																				
278	(données pour le calcul du temps de transport)																																				
279	Récolte 1		kg/ha																																		
280	grain						1	1		1				0					0				0														
281	reste infructescence						1	1		1				0					0				0														
282	feuille						0	0		0				0					0				0														
283	tige						0	0		0				0					0				0														
284	racine						0	0		0				0					0				0														
285	Récolte 2																																				
286	grain		kg/ha				0	0		0				0					0				0														
288	reste infructescence						0	0		0				0					0				0														
289	feuille						0	1		0				0					0				0														
290	tige						0	1		0				0					0				0														
291	racine						0	0		0				0					0				0														
292	PRODUITS TRANSPORTES																																				

	A	B	C	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ		
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																																			
2																																				
3	cultures:																																			
4		dans																																		
5		unité:	le texte:	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	niveaux	intensif	intensif	tous	semi	niveaux	tous	semi	niveaux	tous	semi	niveaux		
294	produit 1:	kg/ha																																		
295	grain					1	1			1					0																					
296	reste infructescence					1	1			1					0																					
297	feuille					0	0			0					0																					
298	tige					0	0			0					0																					
299	racine					0	0			0					0																					
300																																				
301	densité du produit 1	kg/m3			150					300					300																					
302	poids réel/poids sec				1					1					1																					
303																																				
304	produit 2																																			
305	grain					0	0			0					0																					
306	reste infructescence					0	0			0					0																					
307	feuille					0	1			0					0																					
308	tige					0	1			0					0																					
309	racine					0	0			0					0																					
310																																				
311	densité du produit 2	kg/m3			100					100					100																					
312	poids réel/poids sec				1					1					1																					
313																																				
314	fumier:																																			
315	densité du fumier	kg/m3			250					250					250																					
316	poids réel/poids sec				2					2					2																					
317																																				
318	activités de transformation possibles:																																			
319	fouillage au champ					non				non					oui																					
320	transport des résidus à la ferme					oui				oui					non																					
321	brûlage des résidus					oui				non					non																					
322	enfouissement des résidus					non				oui					non																					
323	fabrication de litière					oui				non					non																					
324	fouillage à la ferme					non				oui					non																					
325																																				

	A	B	C	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																					
2				RIZ SUBMERSION			RIZ SUBMERSION				RIZ IRRIGUE		RIZ IRRIGUE							SORGHO		
3	cultures:			NON CONTROLEE			CONTROLEE				GRAVITE		POMPE				BOURGOU			DECRUE		
4		dans	tous			tous				tous		tous		tous		tous		tous		tous		
5		unité:	le texte:	niveaux		niveaux				niveaux		niveaux		niveaux		niveaux		niveaux		niveaux		
6																						
7	type de culture			inon		inon				inon		inon		inon		inon		inon		inon		
8																						
9	REPARTITION DES PERIODES DE L'ANNEE																					
10	Durée de croissance																					
11	minimale		par. 4.1.2	90		90				90		90		90		90		90		150		
12	maximale			180		150				150		150		150		150		150		250		
13																						
14	Début de la croissance			pluv		pluv				mait		mait		mait		mait		pluv		exon		
15	Fin de la croissance			exon		mait				mait		mait		mait		mait		mait		sech		
16																						
17	Nombre de jours absolu		sect. 5.3																			
18	Amendements Matière Organique			20		20				20		20		20		20		20		20		
19	Préparation			7		7				30		30		30		30		30		30		
20	Semis			2		2				5		5		5		5		5		5		
21	Entretien-1			10		10				20		20		20		20		20		20		
22	Entretien-2			0		0				0		0		0		0		0		0		
23	Récolte			7		7				7		7		7		7		7		7		
24	Hors récolte			20		20				20		20		20		20		20		20		
25	Reste			0		0				0		0		0		0		0		0		
26																						
27	Fraction de la saison pluvieuse																					
28	Amendements Matière Organique			0		0				0		0		0		0		0		0		
29	Préparation			0,05		0,05				0		0		0		0		0		0		
30	Semis			0,02		0,02				0		0		0		0		0		0		
31	Entretien-1			0,02		0,02				0		0		0		0		0		0		
32	Entretien-2			0,00		0,00				0		0		0		0		0		0		
33	Récolte			0,00		0,00				0		0		0		0		0		0		
34	Hors récolte			0		0				0		0		0		0		0		0		
35	Reste			0,00		0,00				0		0		0		0		0		0		
36																						
37	Période de récolte																					
38	dans ou hors saison agricole			HS		HS				HS		HS		HS		HS		HS		HS		
39																						
40	TEMPS DE TRAVAUX																					
41	sect. 5.3																					
42	Amendement Matière Organique																					
43	épandage pailis (1)	kg/f		400		400				400		400		400		400		400		400		
44	épandage fumier (1)	kg/f		400		400				400		400		400		400		400		400		
45	Préparation																					
46	arrachage des résidus	kg/f		400		400				400		400		400		400		400		400		
47	grattage	hj/ha																				
48	houage	hj/ha																				
49	billonnage à la main	hj/ha																				
50	billons cloisonnés	hj/ha																				
51	labour de sol à plat (1)	hj/ha			10			10	10			8		8		8		2				
52	labour de sol aux billons (1)	hj/ha																				
53	nivellement	hj/ha										4		4								

	A	B	C	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																					
2				RIZ SUBMERSION			RIZ SUBMERSION				RIZ IRRIGUE			RIZ IRRIGUE							SORGHO	
3	cultures:			NON CONTROLEE			CONTROLEE				GRAVITE			POMPE			BOURGOU				DECRUE	
4			dans	tous			tous				tous			tous			tous				tous	
5		unité:	le texte:	niveaux			niveaux				niveaux			niveaux			niveaux				niveaux	
54	hersage	h/ha																				
55	préparation des semences	h/ha																				
56	pépinière	h/ha																				
57	épandage fumier(2)	kg/j										6			6						1,5	
58	épandage litière(2)	kg/j																				
59	épandage pailis (2)	kg/j																				
60	épandage engrais (1)	h/ha						1	1			1			1						1	
61	irrigation (1)	h/ha										3			3							
62	additionnel(1)	h/ha																				
63																						
64	Semis																					
65	semis manuel	h/ha				1		1	1												10	10
66	semis au semoir	h/ha																				
67	replacage	h/ha										35			35						4	4
68	irrigation (2)	h/ha										1			1							
69	additionnel(2)	h/ha																				
70																						
71	Entretien-1																					
72	hersage (2)	h/ha						1	1													
73	démariage	h/ha																				
74	épandage engrais (2)	h/ha										1			1							4
75	sarclage manuel (1)	h/ha				10		0	20			20			20						4	4
76	sarclage à traction animale (1)	h/ha																				4
77	pulvérisation (1)	h/ha										0,5			0,5							
78	irrigation (3)	h/ha										2			2							
79	additionnel(3)	h/ha																				
80																						
81	Entretien-2																					
82	épandage engrais (3)	h/ha						0	1			1			1							
83	sarclage/désherbage (2)	h/ha				10		35	10			10			10						6	6
84	sarclage/désherbage (3)	h/ha																				
85	pulvérisation (2)	h/ha										0,5			0,5							
86	expulsion des oiseaux (1)	h/ha				2		2	3			8			8							
87	irrigation (4)	h/ha										7			7							
88	additionnel(4)	h/ha																				
89																						
90	Récolte																					
91	expulsion des oiseaux (2)	h/ha				1		1	1,5			4			4							
92	récolte produit 1	kg/jour				60		80	90			110			110						80	100
93	récolte produit 2 (1)	kg/jour																				130
94	additionnel(5)	h/ha																				
95																						
96	Hors récolte																					
97	préparation de la paille	kg/jour				400			400			400			400						400	
98	labour du sol pour l'enfouissement	h/ha																				
99	labour de fin cycle	h/ha					8		8	8												
100																						
101	Rest																					

	A	B	C	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																						
2				RIZ SUBMERSION NON CONTROLEE			RIZ SUBMERSION CONTROLEE				RIZ IRRIGUE GRAVITE		RIZ IRRIGUE POMPE				BOURGOU			SORGHO DECRUE			
3	cultures:			tous			tous				tous		tous				tous			tous			
4			dans																				
5		unité:	le texte:	niveaux			niveaux				niveaux		niveaux				niveaux			niveaux			
102	récolte produit 2 (2)	kg/jour		400			400				400		400				400			400			
103	entretien des digues/canaux	h/ha						5	5			25			16				5				
104	nettoyage	h/ha																					
105	additionnel6	h/ha																					
106																							
107	Tout																						
108	battage/vannage	kg/jour		125			125														75	75	75
109	irrigation	h/ha																					
110	gardiennage	h/ha																					
111	distribution de la paille	kg/jour		400			400				400		400				400			400			
112																							
113	TEMPS D'ATTELAGE		sect. 5.4																				
114	Préparation																						
115	grattage	h/ha																					
116	houage	h/ha																					
117	labour de sol à plat (1)	h/ha				4			4	4			4								1		
118	labour de sol aux billons (1)	h/ha																					
119	nivellement	h/ha										2			2								
120	hersage	h/ha																					
121																							
122	Semis																						
123	semis	h/ha																					
124																							
125	Entretien-1																						
126	hersage (2)							0,5	0,5														
127	sarclage/désherbage (1)	h/ha																					
128																							
129	Entretien-2																						
130	sarclage/désherbage (2)	h/ha																					
131																							
132	Hors récolte																						
133	labour du sol pour l'enfouissement	h/ha																					
134	labour de fin cycle	h/ha				4			4	4													
135																							
136	INTRANTS CONSOMMABLES		sect. 5.5																				
137	semences	kg/ha		70			70					70			70					0		10	10
138	pesticides de semis (chlorothanonil 25 % m.a.)	kg/kg		0,001			0,001					0,001			0,001					0		0,001	0,001
139	pesticides	l/ha		0			0					6			6								
140																							
141	AUTRES COUTS		sect. 5.5																				
142	redevance	FCFA					16000					32000			16000							16000	
143	battage mécanisé	FCFA/kg										2			2								
144	décorticage mécanisé	FCFA/kg										7,2			7,2								
145																							
146	TAUX MINIMAUX DES ELEMENTS NUTRITIFS		sect. 5.2																				
147	Azote																						
148	grain	g/kg		8,5			8,5					8,5			8,5					6		10,9	
149	reste infructescence	g/kg		6			6					6			6					6		2,5	

	A	B	C	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																					
2																						
3	cultures:			RIZ SUBMERSION NON CONTROLEE	RIZ SUBMERSION CONTROLEE		RIZ IRRIGUE GRAVITE	RIZ IRRIGUE POMPE													SORGHO DECRUE	
4			dans	tous	tous		tous	tous														
5		unité:	le texte:	niveaux	niveaux		niveaux	niveaux													tous niveaux	
150	feuilles	g/kg		4			4				4			4			6				5,5	
151	tiges	g/kg		4			4				4			4			6				2,0	
152	racines	g/kg		4			4				4			4			6				2,5	
153																						
154	Phosphore																					
155	grain	g/kg		1,3			1,3				1,3			1,3			1,2				1,3	
156	reste infructescence	g/kg		0,7			0,7				0,7			0,7			1,2				0,2	
157	feuilles	g/kg		0,3			0,3				0,3			0,3			1,2				0,25	
158	tiges	g/kg		0,3			0,3				0,3			0,3			1,2				0,25	
159	racines	g/kg		0,3			0,3				0,3			0,3			1,2				0,2	
160																						
161	Potassium																					
162	grain	g/kg		2			2				2			2			14				2,5	
163	reste infructescence	g/kg		4			4				4			4			14				6	
164	feuilles	g/kg		6			6				6			6			14				6	
165	tiges	g/kg		6			6				6			6			14				6	
166	racines	g/kg		6			6				6			6			14				6	
167																						
168	facteurs de correction																					
169	grain				1,2			1,2	1,2			1,4			1,4			1,2			1,2	1,2
170	reste fruit				1,2			1,2	1,2			1,4			1,4			1,2			1,2	1,2
171	feuilles				1,3			1,3	1,3			1,7			1,7			1,3			1,3	1,3
172	tiges				1,3			1,3	1,3			1,7			1,7			1,3			1,3	1,3
173	racines				1,3			1,3	1,3			1,7			1,7			1,3			1,3	1,3
174																						
175	fraction d'azote fixé			0			0				0			0			0				0	
176																						
177	CARACTERISTIQUES BOTANIQUES		chap. 4																			
178	résistance à l'engorgement (oui/non)			oui			oui				oui			oui			oui				oui	
179	profondeur effective maximales des racines	m		1			1				1			1			1				2	
180																						
181	Pour calcul rendement niveau intensif		par. 4.1.4																			
182	b (Tanner and Sinclair)																					
183	c (Tanner and Sinclair)																					
184	quotient ETA/ETP où rendement commence à baisser																					
185	durée de la période sans couverture du sol complet	jour																				
186	fraction du rendement limité par l'eau à atteindre			0,8			0,8				0,8			0,8			0,8				0,8	
187	fraction perdue par des pertes inévitables			0,2			0,2				0,2			0,2			0,2				0,2	
188																						
189	Pour calcul rendement niveau extensif																					
190	Relation eau infiltrée et rendement																					
191																						
192	Rendements non-calculés				3750			7583	13067									17500			6563	7740
193																						
194	Répartition des parties des plantes		sect. 4.3																			
195	ratio production aerienne/souterraine				6			6	6			7			7			6			4	5
196	relation infructescence/production aerienne				0,25			0,25	0,33			0,6			0,6			0,01			0,18	0,24
197	relation grain/infructescence				0,75			0,75	0,75			0,75			0,75			0,5			0,65	0,65

	A	B	C	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																					
2				RIZ SUBMERSION			RIZ SUBMERSION				RIZ IRRIGUE			RIZ IRRIGUE							SORGHO	
3	cultures:			NON CONTROLEE			CONTROLEE				GRAVITE			POMPE					BOURGOU		DECRUE	
4		dans	tous			tous				tous		tous		tous				tous		tous		
5		unité:	le texte:	niveaux		niveaux				niveaux		niveaux		niveaux				niveaux		niveaux		
196	relation feuille/paille			0,5		0,5				0,5		0,5		0,5			0,5		0,35			
199																						
200	COMPOSITION DES PARTIES DES PLANTES																					
			sect. 5.1																			
201	DPM																					
202	grain			0,21		0,21				0,21		0,21		0,21			0,21		0,21		0,21	
203	reste infructescence			0,21		0,21				0,21		0,21		0,21			0,21		0,21		0,21	
204	feuilles			0,21		0,21				0,21		0,21		0,21			0,21		0,21		0,21	
205	tiges			0,21		0,21				0,21		0,21		0,21			0,21		0,21		0,21	
206	racines			0,21		0,21				0,21		0,21		0,21			0,21		0,21		0,21	
207																						
208	SPM																					
209	grain			0,72		0,72				0,72		0,72		0,72			0,72		0,72		0,72	
210	reste infructescence			0,72		0,72				0,72		0,72		0,72			0,72		0,72		0,72	
211	feuilles			0,72		0,72				0,72		0,72		0,72			0,72		0,72		0,72	
212	tiges			0,72		0,72				0,72		0,72		0,72			0,72		0,72		0,72	
213	racines			0,72		0,72				0,72		0,72		0,72			0,72		0,72		0,72	
214																						
215	RPM																					
216	grain			0,07		0,07				0,07		0,07		0,07			0,07		0,07		0,08	
217	reste infructescence			0,07		0,07				0,07		0,07		0,07			0,07		0,07		0,08	
218	feuilles			0,07		0,07				0,07		0,07		0,07			0,07		0,07		0,08	
219	tiges			0,07		0,07				0,07		0,07		0,07			0,07		0,07		0,08	
220	racines			0,07		0,07				0,07		0,07		0,07			0,07		0,07		0,08	
221																						
222	Possibilité de fourrage			oui		oui				oui		oui		oui			oui		oui		oui	
223																						
224	CARACTERISTIQUES DE CULTURE																					
			sect. 6.3																			
225	Formule de Wischmeler:																					
226	érosivité de la technique culturale				0,001		0,001	0,001		0,001		0,001		0,001			0,001		0,001		0,001	0,001
227																						
228	UTILISATION DES PRODUITS																					
			chap. 7																			
229	Stratégie d'utilisation des résidus:																					
230	libre (les résidues peuvent être utilisés pour l'enfouissement,			oui		oui				oui		oui		oui			oui		oui		oui	
231	le brûlage ou le transport à la ferme)																					
232	paillis			non		non				non		non		non			non		non		non	
233																						
234	Répartition des composants des cultures:																					
235	Produit principal																					
236	grain				1		1			1		1		1			0		0		1	
237	reste infructescence				0		0			0		0		0			0		0		0	
238	feuille				0		0			0		0		0			0		0		0	
239	tige				0		0			0		0		0			0		0		0	
240	racine				0		0			0		0		0			0		0		0	
241																						
242	Résidus à la ferme																					
243	grain				0		0			0		0		0			0		0		0	
244	reste infructescence				1		1			1		1		1			0		0		1	
245	feuille				0		0			0		0		0			0		0		0	

	A	B	C	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																					
2				RIZ SUBMERSION																		
3	cultures:			NON CONTROLEE							RIZ IRRIGUE			RIZ IRRIGUE								
4			dans	tous		tous					GRAVITE			POMPE			BOURGOU			SORGHO		
5		unité:	le texte:	niveaux		niveaux					niveaux			niveaux			niveaux			niveaux		
246	tige				0			0			0			0				0			0	
247	racine				0			0			0			0				0			0	
248																						
249	Résidu au champ 1																					
250	grain				0			0			0			0				0			0	
251	reste infructescence				0			0			0			0				0			0	
252	feuille				1			1			1			1				0,8			1	
253	tige				0			0			0			0				0			0	
254	racine				0			0			0			0				0			0	
255																						
256	Résidu au champ 2																					
257	grain				0			0			0			0				0			0	
258	reste infructescence				0			0			0			0				0			0	
259	feuille				0			0			0			0				0			0	
260	tige				1			1			1			1				0,8			1	
261	racine				0			0			0			0				0			0	
262																						
263	Laisse au place																					
264	grain				0			0			0			0				0			0	
265	reste infructescence				0			0			0			0				0			0	
266	feuille				0			0			0			0				0,2			0	
267	tige				0			0			0			0				0,2			0	
268	racine				1			1			1			1				1			1	
269																						
270	Pailis																					
271	grain				0			0			0			0				0			0	
272	reste infructescence				0			0			0			0				0			0	
273	feuille				0			0			0			0				0			0	
274	tige				0			0			0			0				0			0	
275	racine				0			0			0			0				0			0	
276																						
277	PRODUITS ET OPERATIONS																					
278	<i>(données pour le calcul du temps de transport)</i>																					
279	Récolte 1		kg/ha																			
280	grain				1			1			1			1				0			1	
281	reste infructescence				1			1			1			1				0			1	
282	feuille				0			0			0			0				0			0	
283	tige				0			0			0			0				0			0	
284	racine				0			0			0			0				0			0	
285																						
286	Récolte 2		kg/ha																			
287	grain				0			0			0			0				0			0	
288	reste infructescence				0			0			0			0				0			0	
289	feuille				0			0			0			0				0			0	
290	tige				0			0			0			0				0			0	
291	racine				0			0			0			0				0			0	
292																						
293	PRODUITS TRANSPORTES																					

	A	B	C	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC
1	VALEURS DE BASE RETENUES POUR LES DIFFERENTES NIVEAU:																					
2				RIZ SUBMERSION			RIZ SUBMERSION			RIZ IRRIGUE			RIZ IRRIGUE			SORGHO						
3	cultures:			NON CONTROLEE			CONTROLEE			GRAVITE			POMPE			BOURGOU			DECRUE			
4			dans	tous			tous			tous			tous			tous			tous			
5		unité:	le texte:	niveaux			niveaux			niveaux			niveaux			niveaux			niveaux			
294	produit 1:	kg/ha																				
295	grain				1			1				1			1				0			1
296	reste infructescence				1			1				1			1				0			1
297	feuille				0			0				0			0				0			0
298	tige				0			0				0			0				0			0
299	racine				0			0				0			0				0			0
300																						
301	densité du produit 1	kg/m3			500			500				500			500				300			500
302	poids réel/poids sec				1			1				1			1				1			1
303																						
304	produit 2																					
305	grain				0			0				0			0				0			0
306	reste infructescence				0			0				0			0				0			0
307	feuille				0			0				0			0				0			0
308	tige				0			0				0			0				0			0
309	racine				0			0				0			0				0			0
310																						
311	densité du produit 2	kg/m3			100			100				100			100				100			100
312	poids réel/poids sec				1			1				1			1				1			1
313																						
314	fumier:																					
315	densité du fumier	kg/m3			250			250				250			250				250			250
316	poids réel/poids sec				2			2				2			2				2			2
317																						
318	activités de transformation possibles:																					
319	fouillage au champ			oui			oui				oui			oui				non			oui	
320	transport des résidus à la ferme			oui			oui				oui			oui				oui			oui	
321	brûlage des résidus			oui			oui				oui			oui				non			oui	
322	enfouissement des résidus			non			non				non			non				non			non	
323	fabrication de litière			oui			oui				oui			oui				oui			oui	
324	fouillage à la ferme			oui			oui				oui			oui				oui			oui	
325																						