



Outils et méthodologies pour le suivi des cultures et la prévision agricole en zones sèches

*Cas du département
pilote de Diourbel,
Sénégal*

BOGG
ACLR
246 3/3

*David Boggio
Benoît Sarr*

Harold Roy-Macaulay



Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse

Le CERAAS est un laboratoire national de l'ISRA et un pôle régional d'excellence dans l'étude de l'adaptation à la sécheresse des espèces cultivées en zones sèches. Il bénéficie d'un mandat régional des pays et des institutions de recherche agricole membres de la CORAF¹ et du CILSS². Ce positionnement lui a permis d'ouvrir son expertise en matière de recherche et de formation pour l'amélioration des productions végétales en zones sèches à de nombreuses équipes de recherche à travers le monde. La recherche et la formation au CERAAS adoptent une approche pluridisciplinaire afin d'améliorer les connaissances sur les mécanismes d'adaptation à la sécheresse des végétaux. Les disciplines concernées sont notamment la physiologie, l'agronomie, la bioclimatologie, la sélection, la biochimie, la biométrie et la modélisation. Les connaissances acquises sur le comportement agro-physiologique des plantes en conditions de sécheresse ont été valorisées par le développement d'outils et de méthodologies pour l'estimation précoce de la production agricole.

CERAAS, BP 3320, Thiès Escale, Sénégal.

ceraas@telecomplus.sn

¹Conférence des Responsables de Recherche Agricole en Afrique de l'Ouest et du Centre.

²Comité Inter Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel.



Centre technique de coopération agricole et rurale (ACP-UE)

Le Centre technique de coopération agricole et rurale (CTA) a été créé en 1983 dans le cadre de la Convention de Lomé entre les Etats du groupe ACP (Afrique, Caraïbes, Pacifique) et les pays membres de l'Union européenne.

Le CTA a pour mission de développer et de fournir des services qui améliorent l'accès des pays ACP à l'information pour le développement agricole et rural, et de renforcer les capacités de ces pays à produire, acquérir, échanger et exploiter l'information dans ce domaine. Les programmes du CTA sont articulés sur quatre axes principaux : l'élaboration des stratégies de gestion de l'information et de partenariat nécessaires à la formulation et à la mise en œuvre des politiques, l'encouragement des contacts et des échanges d'expérience, la fourniture d'informations sur demande aux partenaires ACP et le renforcement de leurs capacités en information et communication.

CTA, Postbus 380, 6700 AJ Wageningen, Pays-Bas.

Outils et méthodologies pour le suivi des cultures et la prévision agricole en zones sèches

***Département pilote de Diourbel,
Sénégal***

Avant propos

Malgré les progrès réalisés dans le domaine de l'amélioration de la production agricole et en particulier la production alimentaire dans les pays du Sud, la faim et la malnutrition continuent à se répandre. Dans les pays des zones arides et semi-arides, la sécheresse est une cause majeure de la chute de la production alimentaire et par conséquent de la baisse du niveau économique et sanitaire des populations.

Four taire de la sécurité alimentaire une 'réalité, ces pays doivent associer leurs efforts, surtout dans les domaines de la recherche et du développement, orientés vers la mise au point et la diffusion de technologies agricoles appropriées. Des initiatives doivent être développées pour la détermination de techniques compatibles avec les conditions de l'agriculture au niveau local, qui peuvent être appliquées pendant des périodes prolongées et sans dommage pour l'environnement, afin d'améliorer les rendements.

Dans ce cadre, le Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS) a mené des études de 1995 à 1997 dans le département de Diourbel au Sénégal pour y développer des outils et des méthodes pour le suivi des cultures et la prévision de la production. L'objectif est d'étendre cette étude à une échelle nationale.

Harold Roy-Macauley

Directeur du CE RAAS

Auteurs des travaux

Dr Daniel Annerose, Physiologiste (CIRAD, CERAAS),

M. David Boggio, Agronome-biométricien (CERAAS/ISRA/CORAF),

Dr Benoît Sarr, Bioclimatologiste (CERAAS/ISRA/CORAF),

M. Reginald Guissard, Agronome (CERAAS, ULB).

Rédacteurs

M. David Boggio,

Dr Benoît Sarr,

Dr Harold Roy-Macauley.

Remerciements aux agents du CERAAS, de l'ISRA, du CIRAD, du CSE ainsi qu'aux stagiaires venant des différentes institutions de la sous-région et d'Europe qui ont participé à ces travaux de recherches.



Table des matières

I Introduction	1
2 Outils et méthodes de collecte et d'analyse des données agricoles	2
2.1 La Base Aréolaire de Sondage	.
2.1.1 Contexte.....	?
2.1.2 Aspects théoriques.....	2
2.1.3 Mise en oeuvre	3
2.1.3.1 Elaboration de la Base Aréolaire de Sondage	3
2.1.3.2 Dimensionnement de l'échantillonnage	3
2.1.3.3 Identification des segments..	3
2.2 Mesure de l'occupation des terres agricoles	5
2.2.1 Principe	5
2.2.2 Mesure des parcelles agricoles : méthode et mise en oeuvre	5
2.2.2.1 La triangulation..	5
2.2.2.2 Mise en œuvre.....	5
2.2.3 Le logiciel MAREA de gestion des données	6
2.3 Le suivi de la campagne agricole	7
2.3.1 Les modèles de simulation des cultures..	9
2.3.1.1 Le modèle Ara.B.Hy.	9
2.3.1.2 Le modèle mil	9
2.3.2 Les enquêtes de terrain..	10
2.3.2.1 Mesures agronomiques	10
2.3.2.2 Les relevés de surfaces agricoles..	10
2.3.2.3 Les enquêtes socio-économiques..	10
2.3.2.4 Les relevés climatiques.....	10
2.3.3 La modélisation des rendements à partir de données climatiques	11
2.4 Analyse géostatistique des données	12
2.4.1 Enjeux du traitement géostatistique des données..	12
2.4.1.1 Nécessité d'un traitement géostatistique	12
2.4.1.2 Atouts du traitement géostatistique	12
2.4.2 Les données traitées.....	13
2.4.3 Les informations en sortie : production de cartes thématiques..	14
2.4.4 Perspectives offertes par l'analyse spatiale	14
2.5 Gestion des données et SIG.....	II
2.5.1 Le Système d'Information Géographique	14
2.5.1.1 Gestion et analyse de données..	14
2.5.1.2 Présentation des informations	15
2.5.1 Perspectives offertes par le SIG	15
2.5.2.1 Confrontation d'informations de natures différentes..	15
2.5.2.2 Information zonale.....	16
2.5.2.3 Outil d'aide à la décision personnalisé..	16
3 Résultats Campagne 1997	17
3.1 Pluviométrie et dates de semis	17
3.2 Occupation des surfaces agricoles	18
3.3 Rendements de l'arachide	21
Conclusion	23
Bibliographie	25

1 . Introduction

Depuis 1995, le Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS) développe avec le Centre de Suivi Ecologique (CSE) des outils modernes susceptibles d'améliorer les méthodes de collecte, de gestion et d'analyse de statistiques agricoles nécessaires à l'estimation des rendements et de la production agricole au Sénégal. La méthodologie proposée s'articule autour de systèmes prévisionnels de développement des cultures et privilégie l'exploitation d'outils performants, simples, fiables et peu coûteux. Cette démarche pluridisciplinaire et intégrée développée au CERAAS est menée sur la base des données des modèles de simulation du fonctionnement des cultures et d'enquêtes de terrain couplées à des outils géographiques tels que le Système d'Information Géographique (SIG). Différentes étapes composent le « SIG-suivi des cultures » du CERAAS :

- ▶ la modélisation du développement des cultures (Annerose et Diagne, 1990 ; Sylla, 1995) ;
- ▶ l'acquisition au cours de la campagne de données de terrain pour alimenter ces modèles et pour l'estimation de la production (Laouormadji, 1994 ; Chan Ho Tong, 1996 ; Temara, 1997) ;
- ▶ l'analyse, la synthèse et la représentation cartographique des résultats sur un support informatique (Guissard, 1995, 1996 ; Annerose, 1996 ; Orsatti, 1997).

Cette démarche a conduit à la mise au point d'outils et au choix de méthodes appropriées pour son extension à des espaces géographiques plus vastes que le département de Diourbel, choisi afin d'expérimenter :

- ▶ la mise en place d'une base de sondage géographique (ou aréolaire) ;
- ▶ l'application du système GPS (Global Positionning System) au repérage sur le terrain des zones échantillonnées ;
- ▶ la définition des protocoles d'échantillonnage des unités géographiques à étudier ;
- ▶ l'informatisation de la gestion des données de terrain (repérage, mesures du taux d'occupation des cultures par triangulation, données agronomiques et climatiques) ;
- ▶ l'utilisation d'outils géostatistiques pour l'analyse des données ;
- ▶ la synthèse des informations par l'intermédiaire d'un SIG ;
- ▶ l'édition de bulletins d'analyse sur la base de cartes thématiques.

L'expertise acquise au cours de ces trois années a permis, d'une part de fournir en cours de campagne une estimation fiable de la production arachidière, et d'autre part de définir le cadre d'un système de prévision agricole au Sénégal,

Ce document propose une synthèse des méthodes et des outils mis en œuvre au CERAAS (base de sondage, mesures de terrain, analyse des données). Elle est illustrée par une analyse des résultats de la campagne agricole 1997.

2. Outils et méthodes de collecte et d'analyse des données agricoles

2.1 La Base Aréolaire de Sondage

2.1.1 Contexte

A ce jour, les statistiques agricoles du Sénégal sont fournies à partir des enquêtes de terrain de deux grands projets de la Direction de l'Agriculture (DA) : le projet Diagnostic Permanent (DIAPER) et le projet Alerte Rapide (AR). Ces projets ont un système commun de collecte des données qui repose essentiellement sur des critères socio-démographiques (ménages, exploitations agricoles, « carrés » administratifs). Ce dispositif offre un cadre formel et cohérent pour un suivi de la campagne agricole mais présente deux limites principales :

1. La base démographique présente une importante variabilité durant la campagne agricole, due à la mobilité de la population, et qui affecte directement la précision des données. De ce fait, l'univers sondé n'est pas correctement dénombré. De plus, diverses considérations d'ordre économique et socioculturel peuvent inciter les paysans à omettre volontairement certaines informations au cours du recensement.
2. Les sondages effectués sur une base démographique sont fastidieux, et imposent une charge annuelle de travail considérable qui affecte à la fois la précision des **données** et leur date de disponibilité.

Le CERAAS propose de remplacer cette méthode par une base géographique de sondage, appelée Base Aréolaire de Sondage, dont la réalisation a été le fruit d'une collaboration avec le CSE.

La démarche élaborée au CERAAS a été testée et affinée par le suivi agricole du département de Diourbel durant les saisons 1995 à 1997 (Figure 1).

2.1.2 Aspects théoriques

La Base Aréolaire de Sondage est une technique d'échantillonnage qui repose sur un découpage géographique de l'espace en plusieurs niveaux d'échantillonnage (Wigton, 1991). Cette méthode a été appliquée avec succès pour le recensement agricole dans différents pays européens, aux Etats Unis, au Maroc, au Burkina Faso, etc.

Le Sénégal est divisé en deux niveaux de stratification administratifs :

- ▶ les régions (10) ;
- ▶ les départements (28).

Au sein d'un département (Figure 2), le premier niveau d'échantillonnage correspond à des zones appelées Primary Sampling Unit (PSU). Elles contiennent chacune plusieurs sous-unités, les segments, qui constituent le deuxième niveau d'échantillonnage. Les PSU et les segments sont délimités par des éléments identifiables sur le terrain (routes, pistes, villages...).

La surface des segments dépend du type d'occupation des sols prédominant :

- ▶ 4 ha pour les villes et villages ;
- ▶ 30 ha pour des zones où l'agriculture occupe de 50 à 100% du sol,
- ▶ 50 ha pour des zones où l'agriculture occupe de 10 à 49% du sol,

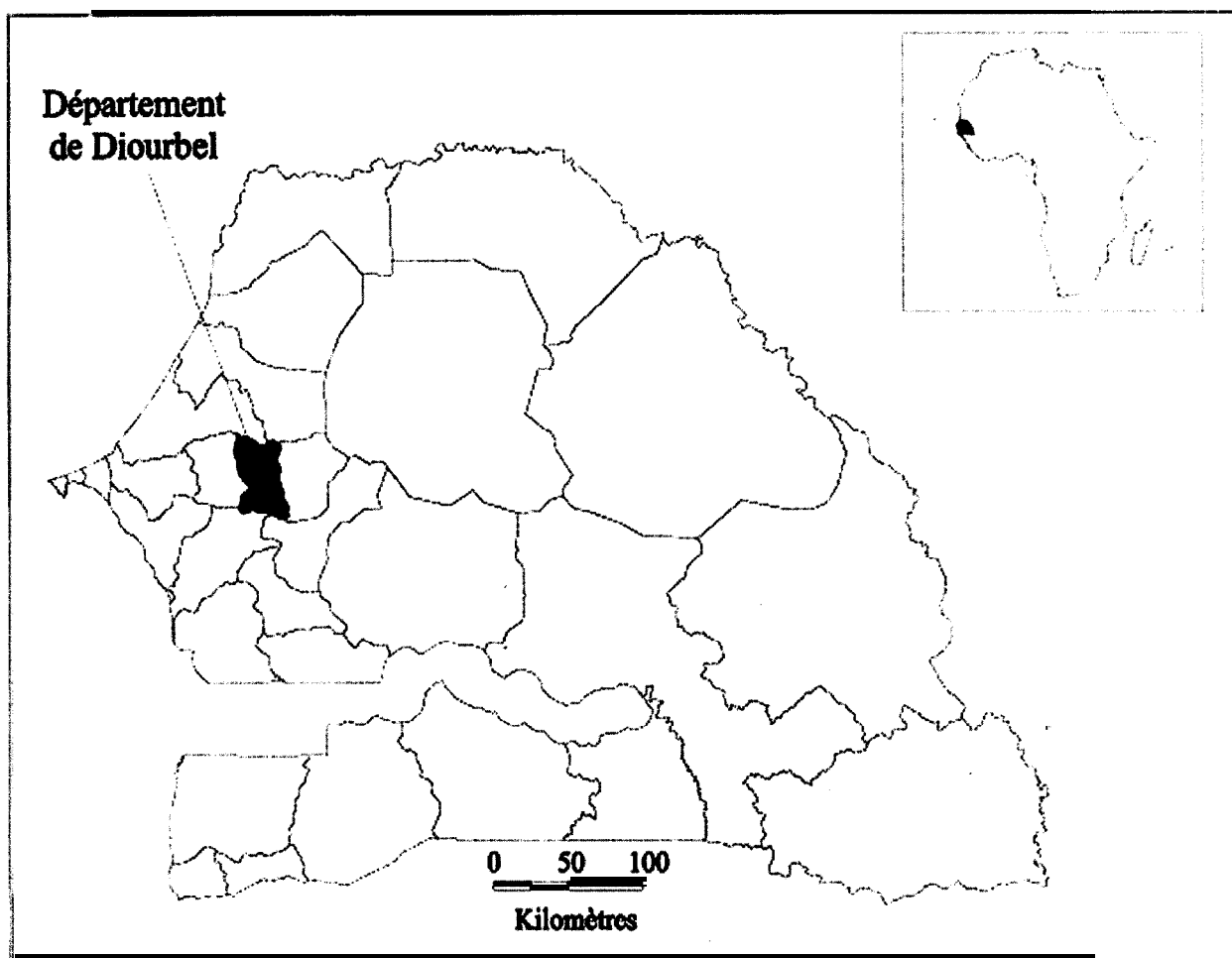


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude.

- ▶ 200 ha pour les pâturages et savanes,
- ▶ 200 ha pour les forêts.

Par rapport aux autres types d'échantillonnage (démographique, socioculturel,...), la base de sondage géographique présente l'avantage d'être plus stable dans l'espace et dans le temps.

La charge de travail qu'elle induit est plus faible et par conséquent les informations sont disponibles plus rapidement. L'investissement nécessaire à son élaboration est relativement élevé mais compensé à long terme par un coût d'exploitation faible.

La Base Aréolaire de Sondage permet la collecte des données dans un format géographique qui facilite leur gestion, validation, analyse et présentation à travers un SIG.

2.1.3 Mise en oeuvre

Le **choix** de la zone-pilote du département de Diourbel a été motivé **d'une** part par la **prépondérance** des **activités** agricoles, qui en fait **une** zone représentative de l'espace rural sénégalais, **et d'autre part** par son accessibilité et l'existence de documents cartographiques.

2.1.3.1 Elaboration de la Base Aréolaire de Sondage

Le **découpage** aréolaire a été réalisé à partir d'images satellitaires Landsat TM (résolution **de 30 m au sol**)

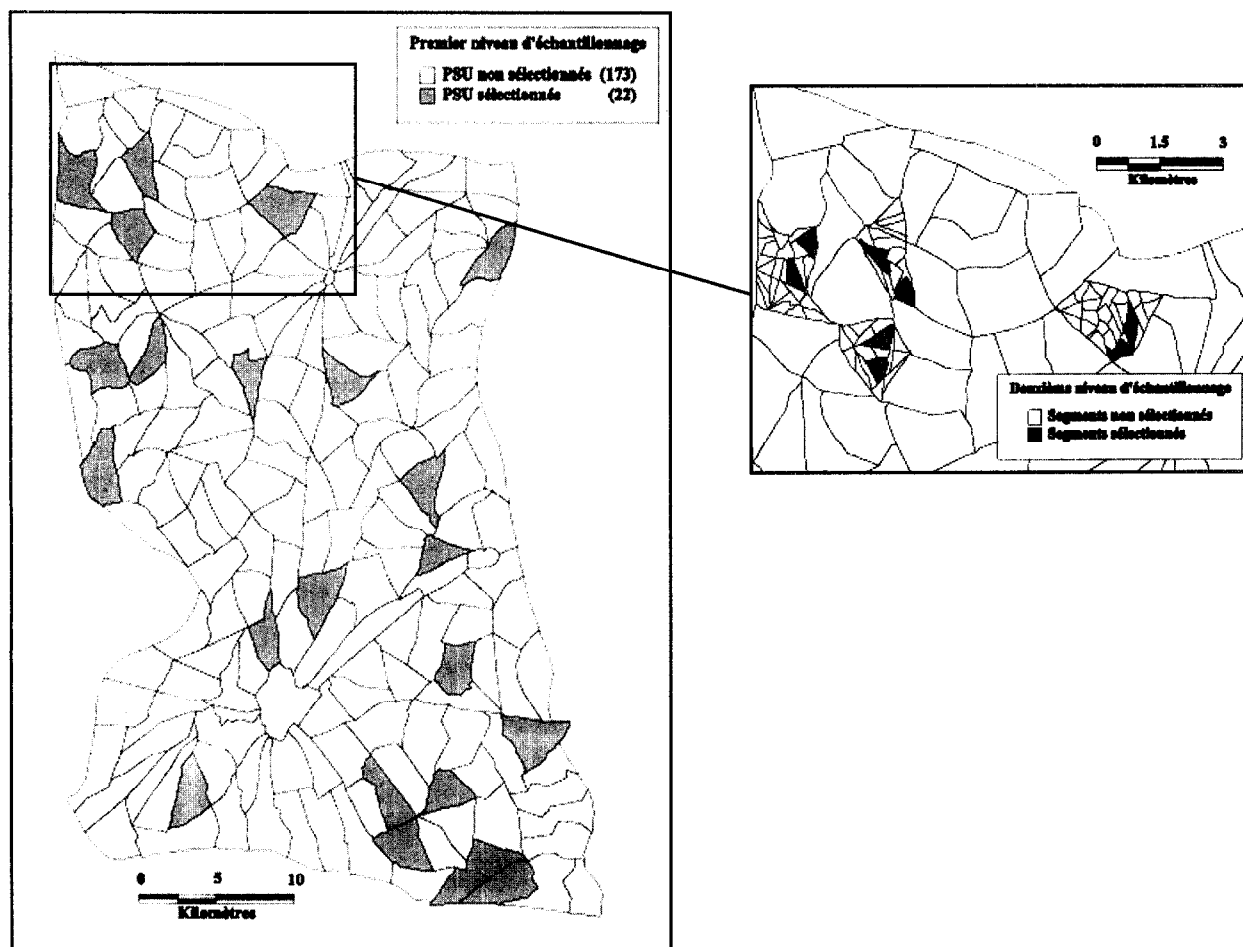


Figure 2 : Base Aréolaire de Sondage : PSU et segments échantillons dans le département de Diourbel.

au 1/ 100 000, de photos aériennes datant de 1989 au 1/60 000 environ et de cartes topographiques de 1992 au 1/200 000 et au 1/50 000. La stratification obtenue a été reportée sur papier calque, puis numérisée et transférée en format vectoriel par le logiciel ArcInfo (CSE, 1996).

Ainsi, le département de Diourbel a été divisé en 194 PSU d'une superficie de 500 à 1 000 ha.

2.1.3.2 Dimensionnement de l'échantillonnage

La Base Aréolaire de Sondage utilisée repose sur trois hypothèses :

- l'essentiel de la variabilité au niveau du département provient de la variabilité inter-PSU, une bonne estimation nécessite donc un grand nombre de PSU ;
- les PSU sont supposés avoir une faible variabilité interne, par conséquent le nombre de segments par PSU à mesurer est faible ;
- les PSU sont supposés avoir des variabilités internes homogènes, raison pour laquelle un même nombre de segments peut être mesuré dans tous les PSU ;

Ces hypothèses ont été validées en 1996 à partir d'une étude complète de deux PSU.

Les PSU échantillons ont été tirés au hasard et, au total, 22 PSU ont été retenus.

En ce qui concerne le nombre de segments à mesurer par PSU, il est apparu que 2 segments suffisaient à estimer les rendements, mais que 4 segments contigus 2 à 2 étaient nécessaires à l'estimation de l'occupation des surfaces agricoles.

2.1.3.3 Identification des segments

Sur le terrain, l'introduction du GPS pour le découpage des segments permet d'améliorer sensiblement la qualité du découpage aréolaire et le repérage dans l'espace. Le récepteur GPS permet de déterminer les coordonnées d'un point de mesures à partir du calcul de sa position relative par rapport à un réseau de satellites. La technique consiste à effectuer un relevé automatique de toutes les pistes que contient le PSU. Un module de l'application **TransGPS** (Olivier, 1997) permet la lecture et l'archivage des données **stockées** en mémoire dans le récepteur GPS. Un autre module propose un découpage du **PSU en** segments de surfaces homogènes. Enfin, des cartes géocodées sont éditées et permettent aux enquêteurs de repérer précisément les zones échantillons.

Ce système a d'abord été testé en 1996. En 1997, l'automatisation des outils d'exploitation des données géocodées et d'édition de documents cartographiques (**TransGPS**, Visual Basic) a facilité l'**extension** de cette méthode à des zones géographiques plus vastes.

2.2 Mesure de l'occupation des terres agricoles

Introduite au CERAAS à travers une collaboration avec le CSE, l'étude de l'occupation des sols est une opération de grande envergure, complexe à mettre en œuvre et nécessitant le traitement d'une quantité importante de données. L'amélioration des protocoles d'acquisition et le développement d'un logiciel de gestion, de traitement et de correction des données ont d'une part permis de réduire les erreurs aux différents niveaux, et d'autre part prédisposé la méthode à son extension.

2.2.1 Principe

L'occupation des terres de cultures des zones sélectionnées dans la Base Aréolaire de Sondage est analysée à partir du recensement exhaustif des terres cultivées. Sur chaque parcelle délimitée, la superficie est mesurée et la culture pratiquée identifiée. L'importance relative de chaque culture dans chaque segment est alors estimée.

Par interpolation et en appliquant les traitements géostatistiques propres à la Base Aréolaire de Sondage, cet indicateur est **cartographié** sur l'ensemble du département.

2.2.2 Mesure des parcelles agricoles : méthode et mise en oeuvre

2.2.2.1 La triangulation

Cette méthode consiste à représenter une parcelle par un polygone, à mesurer la longueur de ses côtés ainsi que l'angle que ceux-ci forment avec le Nord, afin de calculer les surfaces des triangles élémentaires qui le composent. Par sommation algébrique la surface du polygone est déterminée, et la précision de l'estimation de la superficie de la parcelle est calculée (Figure 3).

2.2.2.2 Mise en œuvre

Une équipe de trois enquêteurs relève dans une zone délimitée et pour chaque parcelle les longueurs des côtés et l'angle qu'ils forment avec le Nord (Figure 4).

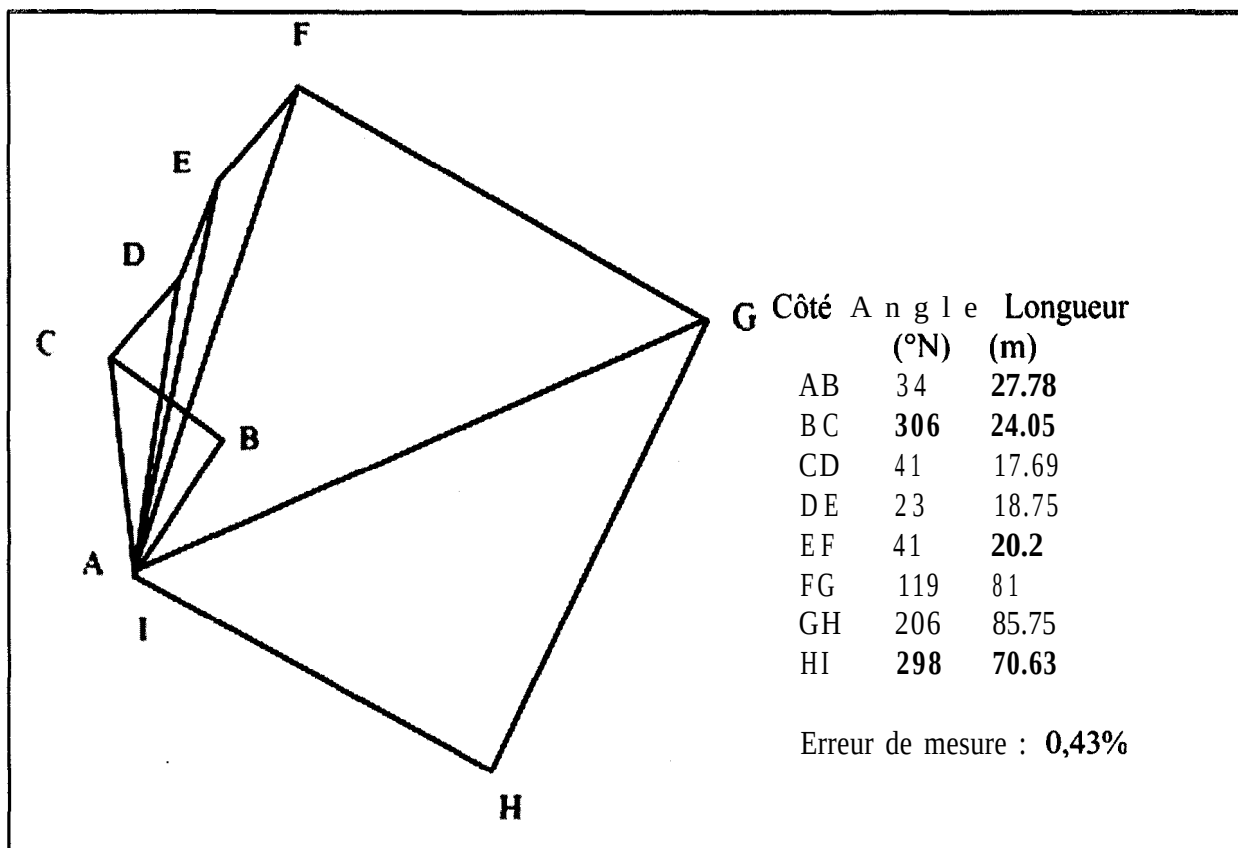


Figure 3 : Découpage d'un polygone .A B C D E F G H en triangles élémentaires et mesures de terrain.

Ces données sont notées sur des fiches de saisie qu'un responsable à l'échelle départementale **relève** chaque semaine. De retour au laboratoire, celui-ci évalue au moyen du logiciel **MAREA** (Mbaye et Boggio, 1997 ; Boggio, 1997) la qualité des mesures, et édite une liste des parcelles à reprendre qu'il portera aux enquêteurs la semaine suivante.

Pour couvrir en 2 mois les 2650 ha répartis en 88 segments que compte la base de sondage du département de Diourbel, les études menées en 1997 ont montré que 6 équipes d'enquêteurs supervisées par un technicien à plein temps sont nécessaires à la gestion des données en temps réel (Martin, 1997).

2.2.3 Le logiciel MAREA de gestion des données

L'encadrement en temps réel de 6 équipes d'enquêteurs qui recueillent de nombreuses données, nécessite un outil de saisie rapide, de traitement et d'analyse de l'information.

Le CERAAS a mis au point **MAREA**, une application informatique sous Visual Basic qui s'appuie sur une architecture de base de données et propose des outils de saisie rapide, de stockage, de traitement et d'analyse des informations (M'Baye et Boggio, 1997). Elle donne à l'opérateur de gestion des données les moyens de visualiser les résultats des mesures de terrain sous forme numérique et graphique, afin de lui permettre de corriger lui-même certaines erreurs, et de choisir les mesures à reprendre avant d'en éditer la liste qu'il transmettra aux enquêteurs (Figures 5 et 6).

Sur demande de l'opérateur, une synthèse des résultats par culture et par segment est dressée; et peut être utilisée pour l'analyse de l'occupation des sols.

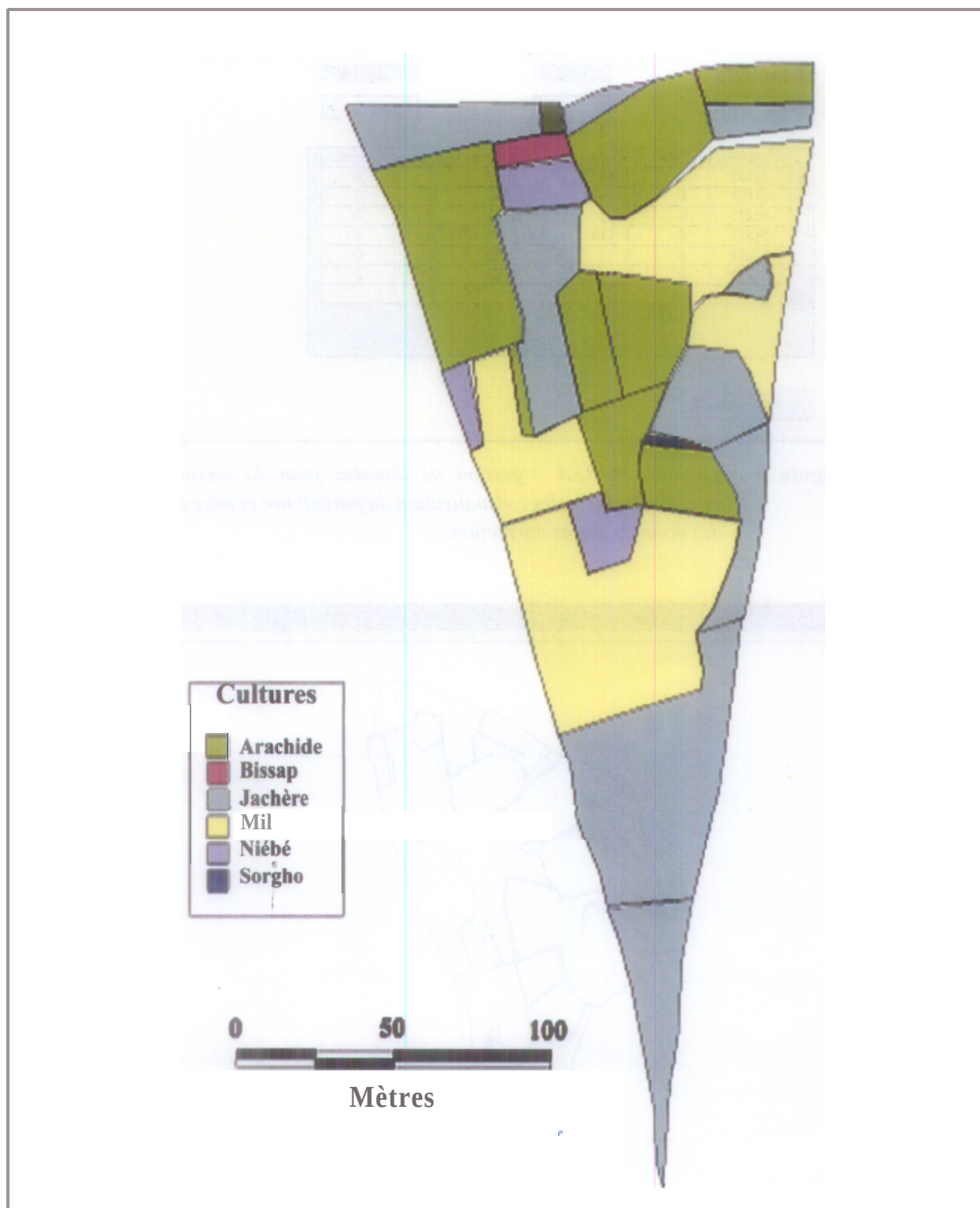


Figure 4 : Parcelleaire d'un segment, plan réalisé à partir des mesures de terrain (segment 4016, 1997).

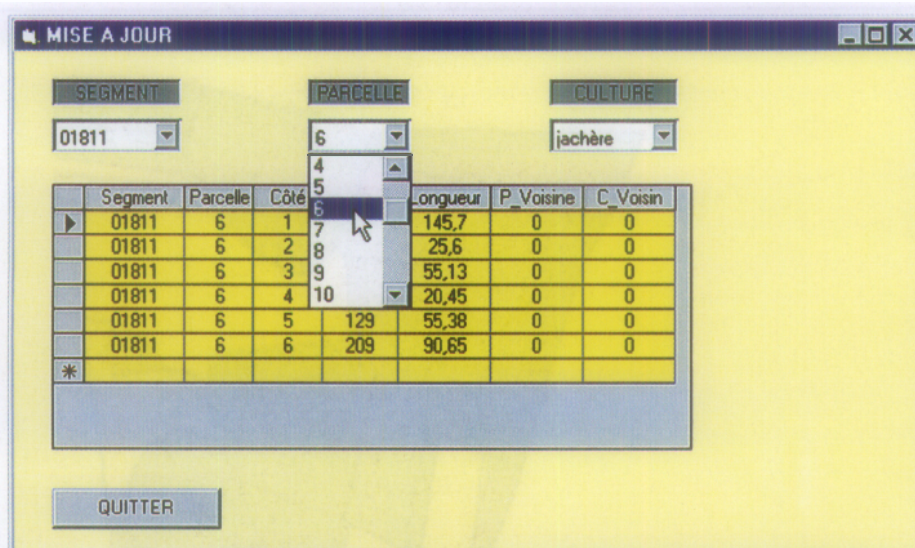


Figure 5 : Logiciel **MARE** : gestion de données pour la mesure de superficies agricoles, visualisation du parcellaire et mise à jour des données après correction.

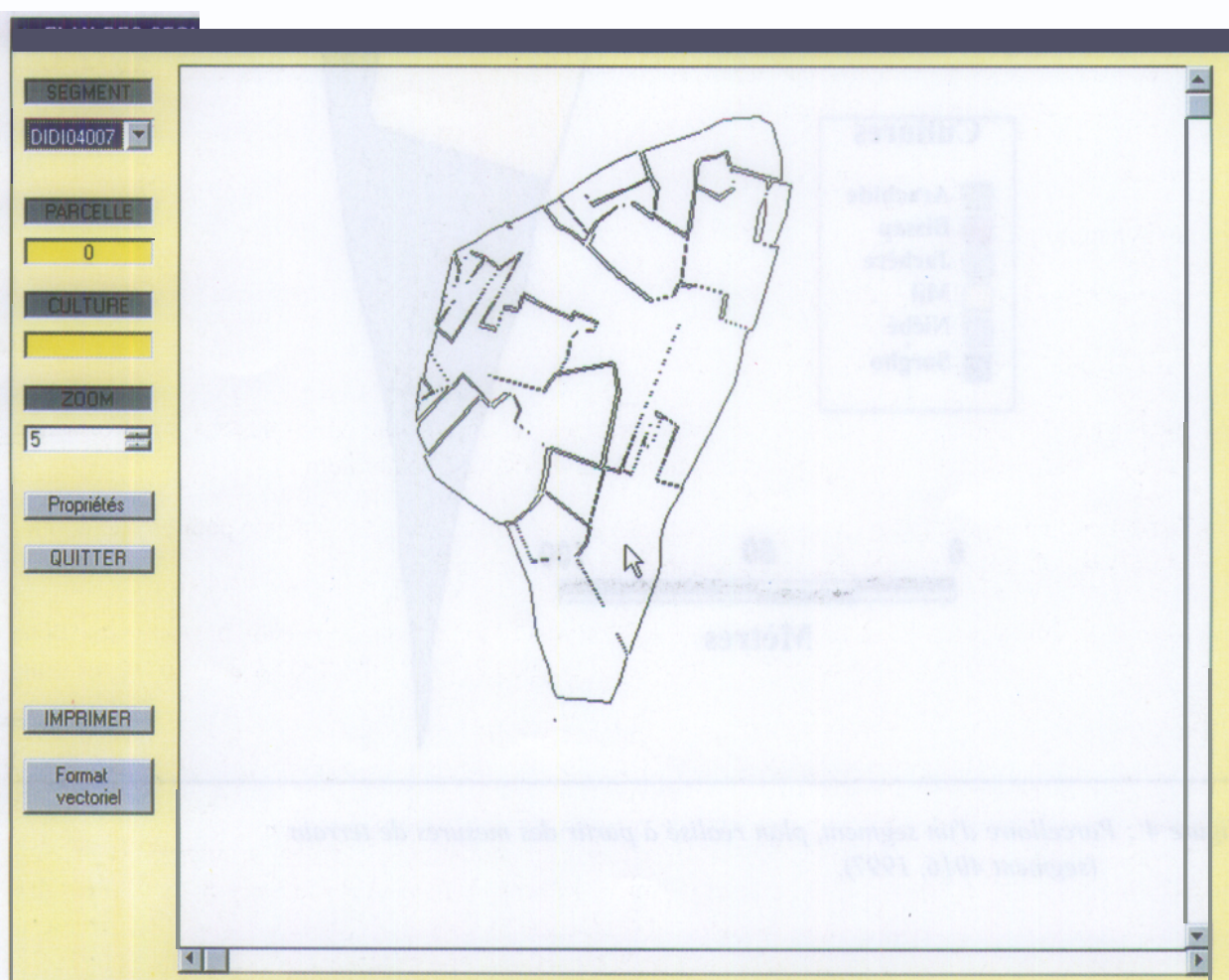


Figure 6 : Logiciel **MARE** : **visualisation** du parcellaire.

2.3 Le suivi de la campagne agricole

Il est basé sur des enquêtes de terrain et sur l'exploitation des résultats de la simulation du développement des cultures.

2.3.1 Les modèles de simulation des cultures

2.3.1.1 Le modèle Ara.B.Hy.

Depuis 1990, le CERAAS valorise des résultats d'expérimentations agrophysiologiques obtenus en conditions semi-contrôlées et réelles, par la définition d'outils dynamiques de modélisation des processus de la croissance et de la productivité agricole. (Annerose et Diagne, 1990, 1995, 1996 ; Mathieu, 1990 ; Marone, 1994 ; Sautereau, 1994).

Le modèle Ara.B.Hy. est un modèle semi-déterministe simplifié et autoparamétrable (Sylla et Boggio, 1997 ; Sako, 1997), basé sur une intégration :

- ▶ des éléments du bilan hydrique;
- ▶ des réponses physiologiques simples de la plante au stress hydrique ;
- ▶ du comportement variétal.

Dans des conditions agropédologiques données (type de sol, pratiques culturales), Ara.B.Hy. permet d'apprécier les caractéristiques de la sécheresse et ses effets sur :

- ▶ la consommation en eau ;
- ▶ la dynamique d'enracinement ;
- ▶ la production de matière sèche ;

Deux exploitations du modèle sont alors faites :

- ▶ prévision du rendement : dès la mi-campagne, une extrapolation des fonctions de croissance appliquée à chaque site fournit une estimation de la production arachidière ;
- ▶ estimation de la production : connaissant le profil pluviométrique de la campagne pour un site donné, Ara.B.Hy. fournit une estimation du rendement potentiel en arachide.

Le modèle Ara.B.Hy. est utilisé tant pour le suivi des cultures à l'échelle de la parcelle paysanne que pour la prévision des rendements agricoles à l'échelle nationale. Il constitue à cet effet, un outil approprié pour le SIG.

2.3.12 Le modèle mil

Les travaux réalisés sur le mil en CERAAS depuis 1996 évaluent la croissance et la productivité du mil cultivé sous différents régimes hydriques. Les premiers résultats des essais agronomiques constituent des référentiels pour la mise au point d'un modèle. Le modèle mil en cours d'élaboration décrit les réactions de la culture au stress hydrique. La phénologie, la répartition et l'accumulation de la matière sèche aérienne entre les différents organes (feuilles, tiges, épis), sa répartition vers le grain, et la sénescence du mil sont décrits en fonction de la somme de degrés-jours et du taux de satisfaction des besoins en eau de la plante (Sarr, Boggio, Annerose et Macauley, 1998). Il offre de bonnes perspectives pour la prévision de la production milicole au Sénégal.

2.3.2 Les enauêtes de terrain

2.3.2.1 Mesures agronomiques

Deux séries de mesures ont été pratiquées au niveau des segments échantillonnés :

1. Prévision du rendement par un suivi agrophénologique de l'arachide à 20, 40, 60 et 75 jours après semis. Les observations portent sur :
 - ▶ la **date** de semis ;
 - ▶ la densité de semis ;
 - ▶ les stades de croissance ;
 - ▶ l'indice de surface foliaire et taux de couverture du sol (LAI 2000 et ceptomètre) ;
 - ▶ la biomasse sèche.
2. Estimation du rendement final en arachide et en mil par mesure de biomasse sèche des :
 - ▶ feuilles ;
 - ▶ tiges ;
 - ▶ gousses ou épis ;
 - ▶ grains.

Lors de la campagne 1997, la première série de variables a alimenté le modèle Ara.B.Hy et a permis de fournir une prévision du rendement 1 mois avant la **fin** de la campagne agricole.

La deuxième série a permis de **cartographier** les données de rendements qui, couplées aux mesures de l'occupation des sols, conduisent dès la fin de la campagne à l'estimation de la production en arachide du département de Diourbel.

2.3.2.2 Les relevés de surfaces agricoles

Depuis 1995, la technique de la triangulation a été retenue pour la mesure des surfaces agricoles. En 1997, l'enquête de terrain sur les segments échantillons a été menée par 4 équipes de trois techniciens réparties à travers les PSU échantillons.

2.3.2.3 Les enquêtes socio-économiques

La Base Aréolaire de Sondage mise en place dans le département de Diourbel n'a été jusqu'en 1997 que très peu exploitée pour l'étude des bases socio-économiques des variations spatiales du rendement des cultures vivrières et industrielles. Dans l'objectif de l'extension du SIG à l'échelle nationale, le CERAAS a déterminé les variables socio-économiques susceptibles d'expliquer les hétérogénéités locales, afin de fournir aux décideurs un outil d'identification des systèmes déficients (Staub, 1997).

2.3.2.4 Les relevés climatiques

La simulation du bilan hydrique et de la productivité des cultures est établie à partir des données pluviométriques issues du réseau d'observation de la météorologie nationale et de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA).

En 1997, un réseau dense composé de 25 pluviomètres installés en champ paysan a été mis en place dans le département de Diourbel. Une comparaison des données pluviométriques précises du réseau dense et de

celles issues d'un calcul géographique par interpolation à partir du réseau national a été réalisée (Annez, 1997). Il est apparu que l'interpolation du réseau national ne permettait pas de rendre compte des variations climatiques locales, mais fournissait tout de même une estimation fidèle de la pluviométrie à l'échelle du département.

Les productions calculées à partir des différents réseaux sont proches, ce qui valide l'approche d'interpolation des données des sites pluviométriques nationaux et l'estimation des rendements par simulation du bilan hydrique et de la productivité des cultures.

2.3.3 La modélisation des rendements à partir de données climatiques.

Le modèle Ara.B.Hy. simule le rendement potentiel de variétés d'arachide dans les conditions de l'environnement (sol, climat, pratiques culturales.) où elles sont cultivées. Il est établi à partir des relevés pluviométriques auxquels on compare les scénarios pluviométriques historiques du même site, afin de monter des scénarios potentiels. La modélisation de la production obtenue fournit une prévision de la production finale selon trois scénarios : mauvais, moyen et bon. Cette démarche permet d'estimer la production potentielle un mois avant la récolte avec une précision supérieure à 90 %.

La figure 7 présente les rendements potentiels de l'arachide en fin de campagne dans le bassin arachidier. Ces rendements oscillent entre des valeurs inférieures à 0,5 tonnes dans l'extrême Nord et des valeurs supérieures à 2,5 tonnes dans certains secteurs du Centre et de l'Est du bassin arachidier.

La notion de rendement potentiel correspond ici au rendement maximal que peut atteindre l'arachide lorsque le seul facteur limitant est la disponibilité en eau.

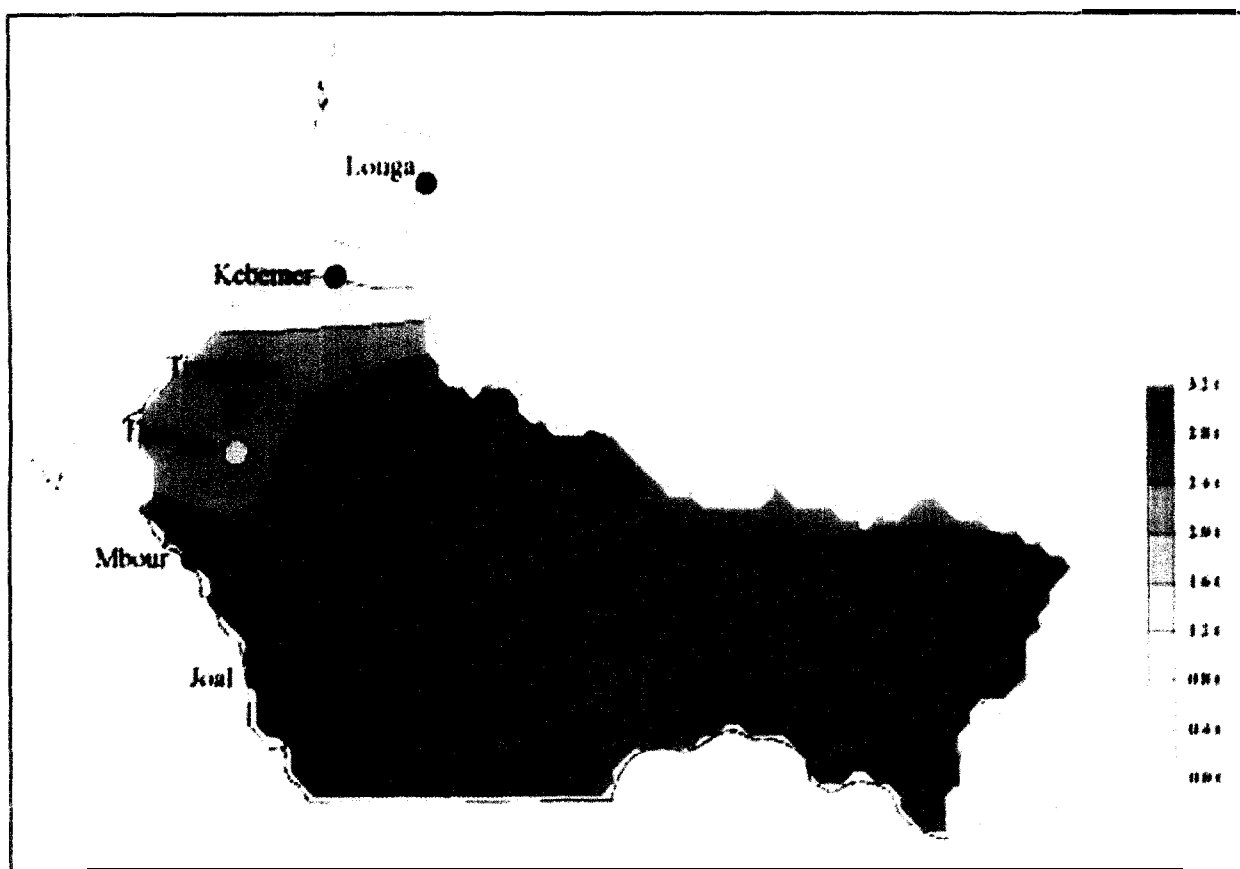


Figure 7 Rendement.~ potentiels en graines d'arachide dans le bassin arachidier, Ceraas 1997.

2.4 Analyse géostatistique des données

Il ne s'agit pas d'énoncer les principes de la géostatistique mais d'en présenter les utilisations, les enjeux et les potentialités pour l'analyse de données géographiques,

2.4.1 Enjeux du traitement géostatistique des données

2.4.1.1 Nécessité d'un traitement géostatistique

La géostatistique permet, à partir de mesures ponctuelles d'une variable **référéncée** dans l'espace, d'établir par interpolation une carte de la répartition de cette variable (**Chauvet**, 1994).

En deux points très proches, la variable mesurée peut avoir des valeurs très différentes, soit à cause de l'imprécision de la mesure, soit à cause de la variabilité du **phénomène étudié**. L'**interpolation** tient compte du niveau de confiance à accorder à chaque mesure, afin de proposer des cartes **qui** dépassent les variations locales pour présenter la répartition moyenne d'une variable,

L'exemple du cumul pluviométrique 1997 illustre la nécessité de considérer les variations locales du phénomène avant d'en présenter une cartographie (Figures **8a**, **8b** et **8c**). Sinon, des données ponctuelles aberrantes ou exceptionnelles risquent à elles seules d'être à l'origine de zones de valeurs aberrantes. A Louga (ville du Nord du Sénégal) par exemple, le cumul pluviométrique était de 141 mm, et a, à lui seul déterminé une zone de précipitations inférieures à 200 mm au Nord du **Sénégal**, alors que les données des sites de Saint-Louis et Matam indiquent respectivement 225 mm et 199 mm (Figure 8a). Le traitement géostatistique tient compte de la variabilité de la pluviométrie, et considère la mesure de Louga comme exceptionnelle sur la base de l'étude du phénomène à l'échelle du pays (Figure 8c).

2.4.1.2 Atouts du traitement géostatistique

L'analyse spatiale des données permet de critiquer les données, **déterminer** leur variabilité et calculer la précision de leur interpolation.

Détecter les données aberrantes

La variabilité du phénomène est estimée, et l'écart de certaines valeurs à la distribution estimée de la variable étudiée est **un** outil de détection de données à vérifier ou écarter.

Tenir compte de la variabilité

Il est très rare que la variable étudiée soit parfaitement continue, elle fluctue autour d'une valeur moyenne pour une zone considérée. La géostatistique permet de faire la part des variations ponctuelles et de la répartition spatiale de la variable.

Calculer la précision de l'estimation en tout point

La précision de l'estimation de la valeur de la variable étudiée **dépend d'une** part de sa variabilité et d'autre part de la densité du réseau de mesures ponctuelles qui permet de la calculer. Il est alors possible d'éditer une carte de la précision des valeurs proposées à partir de la carte des **données** interpolées.

La géostatistique est donc un outil **très** précieux d'analyse des **données spatiales**. Le CERAAS dispose de l'expertise et des moyens informatiques nécessaires à son utilisation, et l'a introduite dans tous ses traitements de données spatiales.

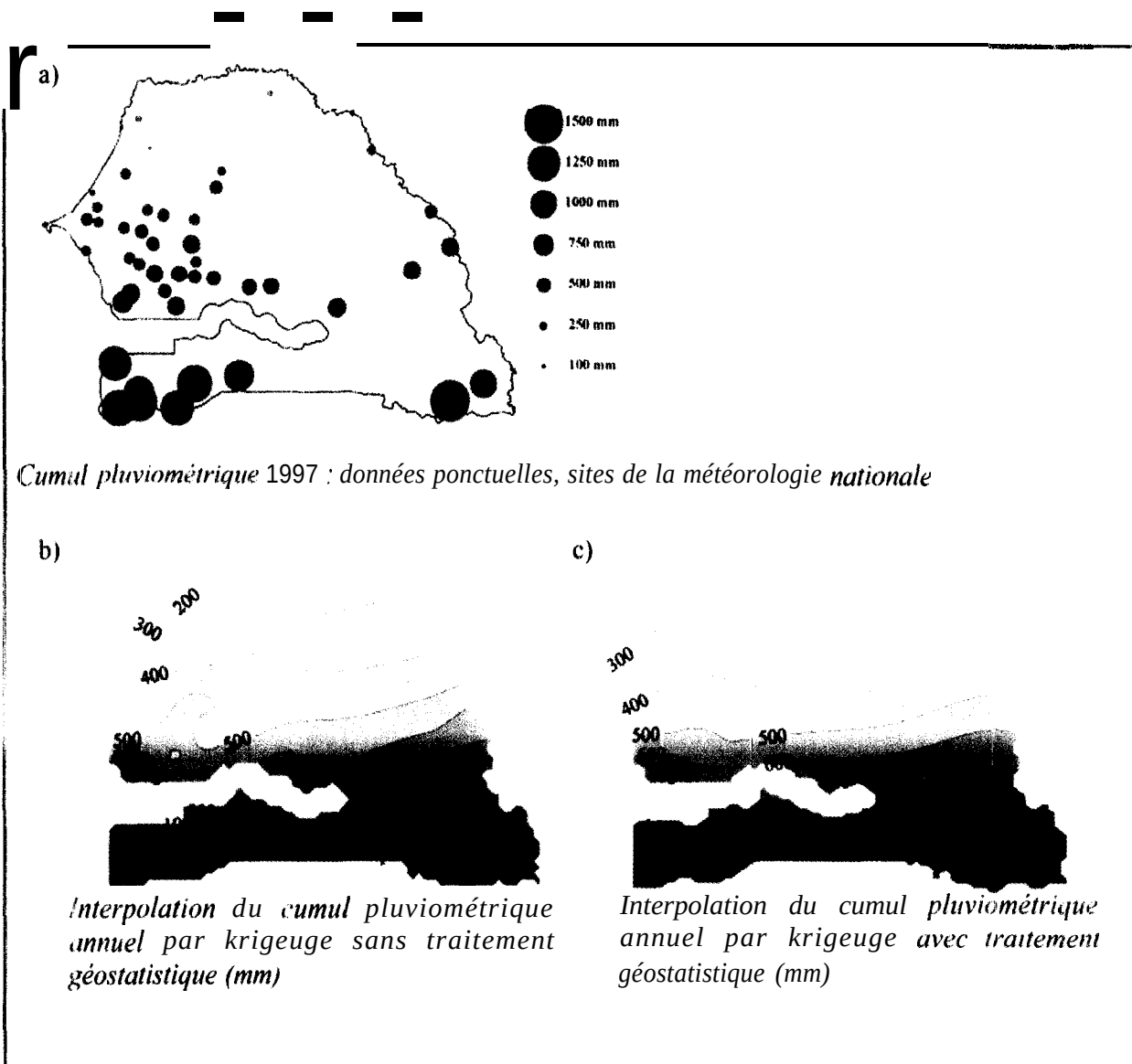


Figure 8 : Analyses spatiales comparées du cumul pluviométrique durant l'hivernage 1997, données ponctuelles, interpolations avec et sans traitement géostatistique.

Toutes les données ponctuelles et géoréférencées peuvent être analysées par des méthodes géostatistiques. Il s'agit pour le **SIG** « suivi de la production agricole dans le département de Diourbel » de :

1. Données pluviométriques :
 - ▶ cumuls annuels ;
 - ▶ cumuls décadaires ;
 - ▶ durée des pauses pluviométriques.
2. Données de simulation du développement des cultures :
 - ▶ date de semis ;
 - ▶ taux de satisfaction des besoins en eau ;
 - ▶ rendement potentiel à une date donnée.

3. Importance relative en superficie des cultures :
- ▶ taux d'occupation en arachide, mil, niébé, sorgho ;
 - ▶ taux de surfaces laissées en jachère.

2.4.3 Les informations en sortie : production de cartes thématiques

L'information en sortie peut être présentée **sous forme continue (isahyètes. Figure 8) ou** discontinue, c'est à dire en calculant la **moyenne** de la variable sur une zone déterminée. Il est ainsi possible d'affecter à chaque **PSU** une valeur de la variable étudiée et la précision de son estimation, afin de constituer une couche de données exploitée dans le **SIG**.

2.4.4 Perspectives offertes par l'analyse spatiale

Les mesures de terrain sont ponctuelles mais précises, contrairement aux données **issues** de dispositifs d'observation comme le satellite, qui sont synthétiques mais dont on dispose sur l'ensemble du territoire étudié.

Coupler la télédétection avec le sondage de terrain permet de bénéficier à la fois de la précision de la première technique et de la couverture spatiale de la seconde,

Des études sont en cours au CERAAS pour identifier des données satellitaires dont les valeurs seront corrélées avec les variables mesurées sur le terrain. La synthèse de ces deux sources d'information par **co-**krigeage, méthode géostatistique d'analyse de variables corrélées, augmentera considérablement la précision des estimations.

2.5 Gestion des données et SIG

2.5.1 Le Système d'Information Géographique

2.5.1.1 Gestion et analyse de données

Un SIG se présente sous la forme d'un ensemble logiciel qui permet **de** saisir plusieurs informations relevées sur un même objet graphique. Un objet graphique est un polygone **géoréférencé** qui représente une unité élémentaire de découpage de l'espace, qui peut être inclus dans **un** découpage d'une échelle supérieure. Ainsi, dans le SIG-suivi de la production agricole? le territoire sénégalais est divisé en régions, puis en départements, en PSU et enfin en segments. Qu'elles soient issues **de** prélèvements, d'interpolation d'informations ou de modélisation, les données sont introduites et gérées au niveau du segment.

L'originalité du **SIG** réside dans sa puissance d'analyse conjointe de l'information : les informations (appelées couches) sur les objets graphiques peuvent être confrontées, corrélées, multipliées, etc. pour des analyses inter **ou/et** intra-couches.

Exemple 1 : si un objet graphique en contient d'autres (par exemple, un département contient plusieurs PSU), il est possible de créer des variables de synthèse (analyse intra-couche) qui rendent compte de leur valeur moyenne et de leur variabilité (rendement moyen par PSU, par département, par région),.

Exemple 2 : le **SIG** offre la possibilité d'effectuer des opérations inter-couches, comme pour calculer la production en arachide d'un PSU (Figure 9) :

$$\text{Production} = \text{Taux d'occupation} * \text{Rendement} * \text{Superficie du PSU}$$

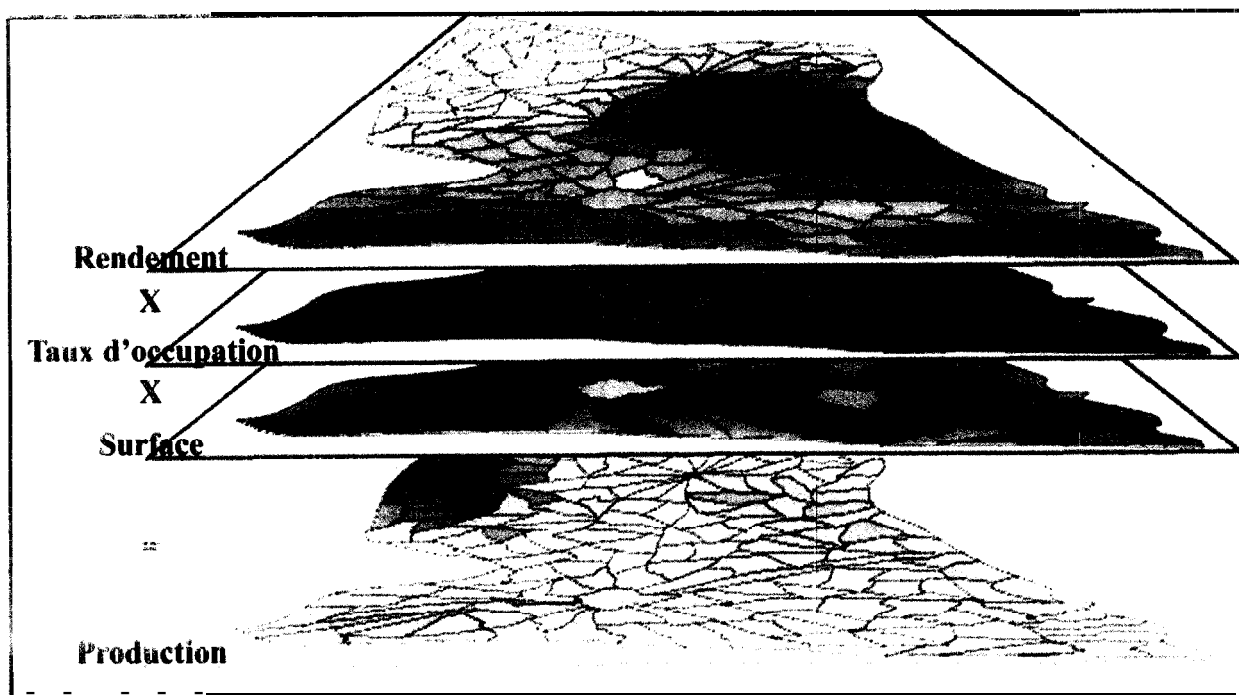


Figure 9 : Calcul de la répartition de la production en arachide à partir d'une analyse croisée des cartes de rendement, de taux d'occupation et de surface des PSU.

La sommation des productions des PSU (analyse intra-couche) fournit une estimation de la production : 12 750 tonnes de gousses d'arachide en 1997 dans le département de Diourbel.

2.5.E.2 Présentation des informations

Toute Information issue du SIG est une requête qui spécifie le type d'information désire et la zone sur laquelle la synthèse ou la cartographie doit être effectuée.

Le SIG est donc à même de répondre à beaucoup de demandes personnalisées, sur des zones vastes ou restreintes, au sujet d'informations élémentaires ou élaborées.

Si la requête concerne la répartition d'une variable sur un territoire, le SIG permet entre autres de :

- ▶ présenter une analyse par classes de valeur,
- ▶ délimiter des zones de valeur équivalente,
- ▶ calculer les surfaces de chacune de ces zones.

Toutes ces informations sont capitales pour un décideur, et expliquent le succès du SIG chez tous les organismes de gestion de l'espace et des ressources naturelles et humaines.

2.5.2 Perspectives offertes par le SIG

2.5.2.1 confrontation d'informations de natures différentes

Le SIG est une solution pour exploiter des données de sources différentes recueillies à des échelles différentes, sans perte d'information, Il est par exemple possible de croiser une information continue (pluviométrie, ...) avec une information zonale (nature des sols, ...), des données départementales avec des données régionales, ...

2.5.2.2 Information zonale

Le SIG n'est pas limité par la dimension de la zone d'étude, il peut tout à la fois être synthétique et précis. Sa mise en place à une échelle réduite est donc aisément transférable à une échelle plus vaste.

De plus., la gestion des données est elle-même **zonale**, ce qui autorise une décentralisation des centres de traitement de l'information avant analyse globale.

2.5.2.3 Outil personnalisé d'aide à la décision

Le principal atout intéresse l'utilisateur final des informations, qui trouvera une réponse rapide à ses requêtes personnalisées grâce à :

- ▶ l'élaboration de variables de synthèse ;
- ▶ la présentation des analyses sur des cartes thématiques ;
- ▶ la définition de zones prioritaires ;
- ▶ des réponses à toutes les échelles (PSU, département, région, . . .).

Le SIG constitue ainsi un outil géographique essentiel **pour** la connaissance des potentialités agricoles et des ressources d'un pays.

3 Résultats Campagne 1997

3.1 Pluviométrie et dates de semis

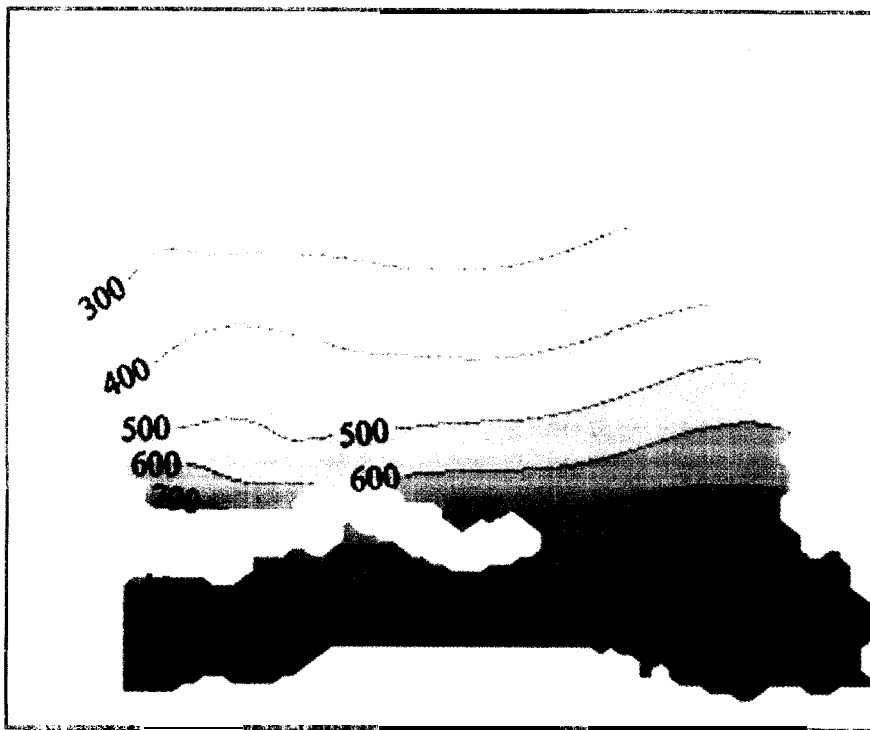


Figure 10 : Pluviométrie cumulée à l'échelle nationale en mm (données Météorologie Nationale et Isra, analyse géostatistique Ceraas, 1997).

A la fin de l'hivernage 1997, les cumuls pluviométriques au Sénégal sont compris entre des valeurs inférieures à 300 mm au Nord à des valeurs supérieures à 1 200 mm dans le Sud-Est. De façon générale, ces totaux saisonniers sont inférieurs ou égaux à 400 mm sur la zone sahélienne (région de Saint-Louis, Thiès, Diourbel), et compris entre 400 et 700 mm dans les régions de Fatick et Kaolack et supérieurs à 800 mm au Sud de la Gambie (Figure 10).

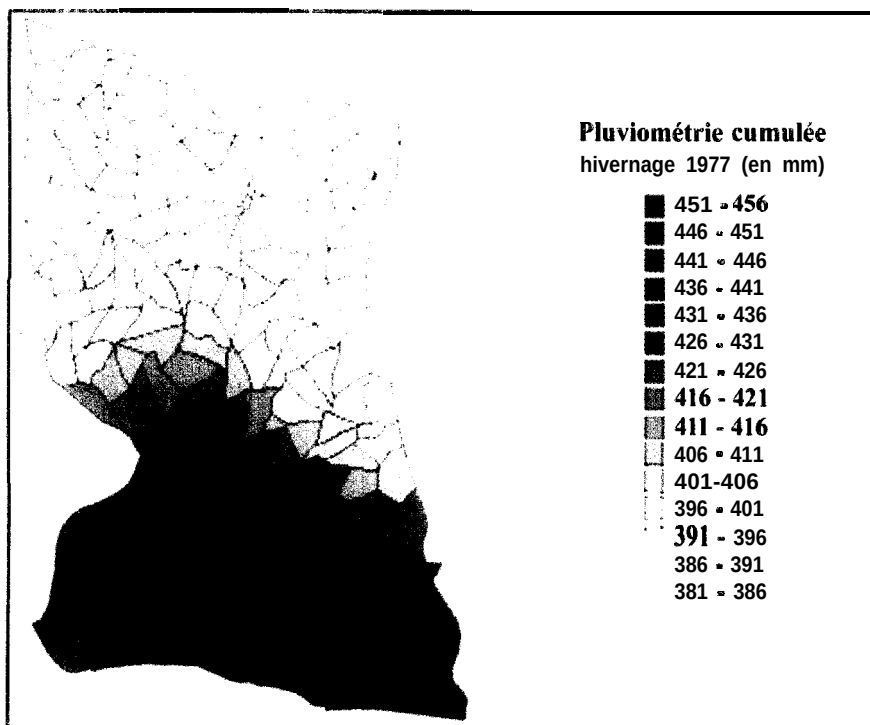


Figure 11 : Pluviométrie cumulée à l'échelle départementale (en mm) (données Météorologie Nationale et Isra, analyse géostatistique Ceraas, 1997).

Les cumuls pluviométriques dans le Département de Diourbel ont oscillé entre des valeurs inférieures à 400 mm au Nord à des valeurs de l'ordre 450 mm dans le Sud. Comparée à la période 1965-1995 (non présenté ici), la pluviométrie annuelle est normale voire légèrement déficitaire (Figure 11).

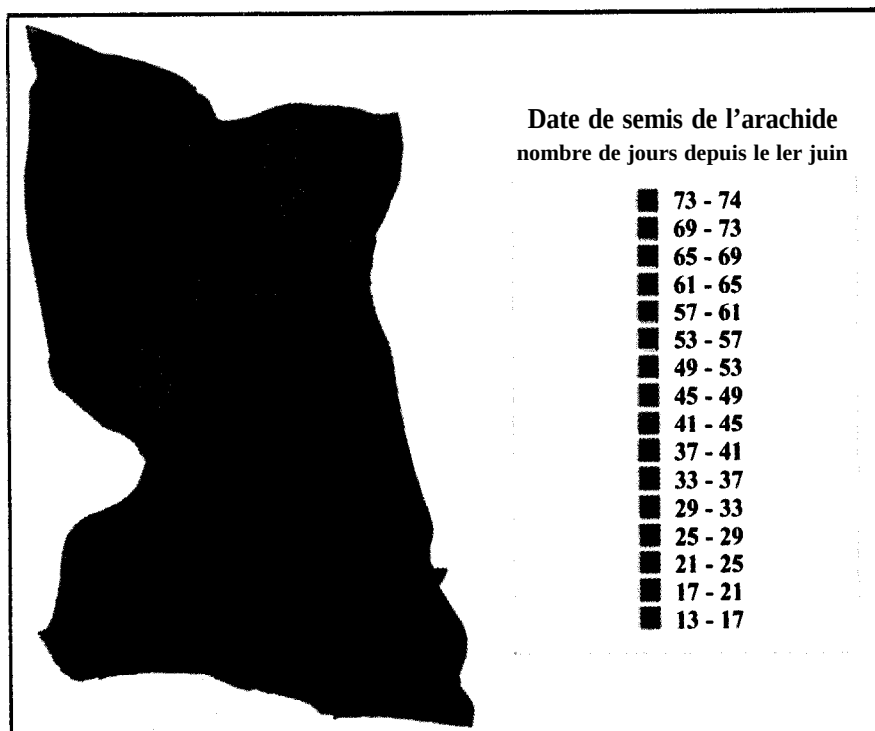


Figure 12 : Date de semis de l'arachide dans le département de Diourbel, en nombre de jours depuis le 1er Juin 1997 (données et analyse géostatistique, Ceraas, 1997).

L'hivernage 1997 se caractérise par un étalement des dates de semis utiles entre juin et août. La dernière décade de juin a été favorable à la mise en place des premières générations de semis dans le Sud-Est du département. Tandis que la fin de la première décade de juillet permet l'extension des semis dans le centre et le Nord-Est. L'extrême **Nord-Ouest** a enregistré les semis les plus tardifs. La récession progressive des pluies survenues en juillet-août est à l'origine de nombreuses vagues de resemis du mil. Il s'en est suivi une forte variabilité de l'occupation des sois et de la production agricole (Figure 12).

3.2 Occupation des surfaces agricoles

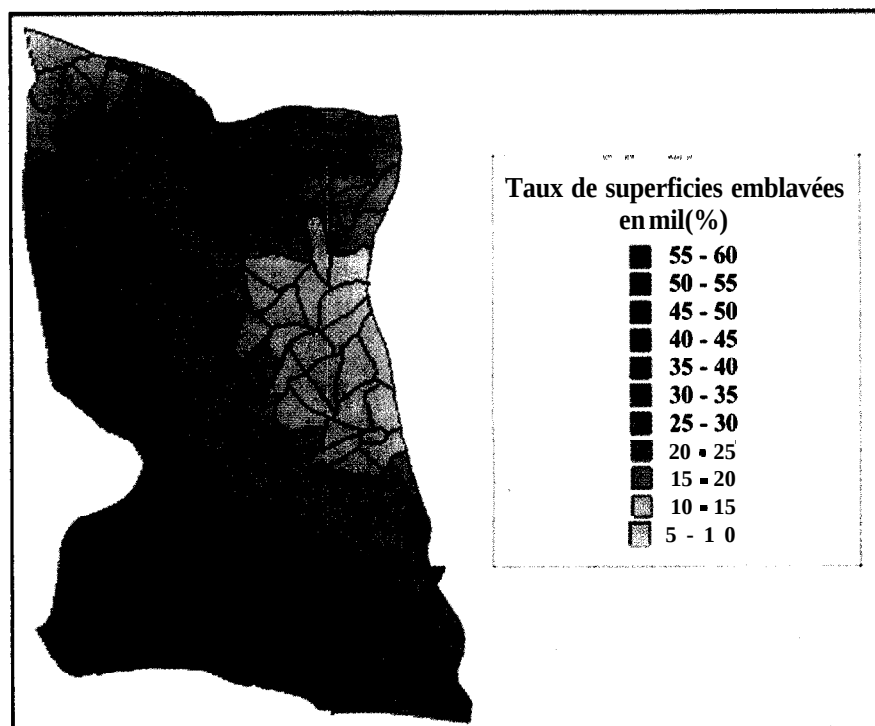
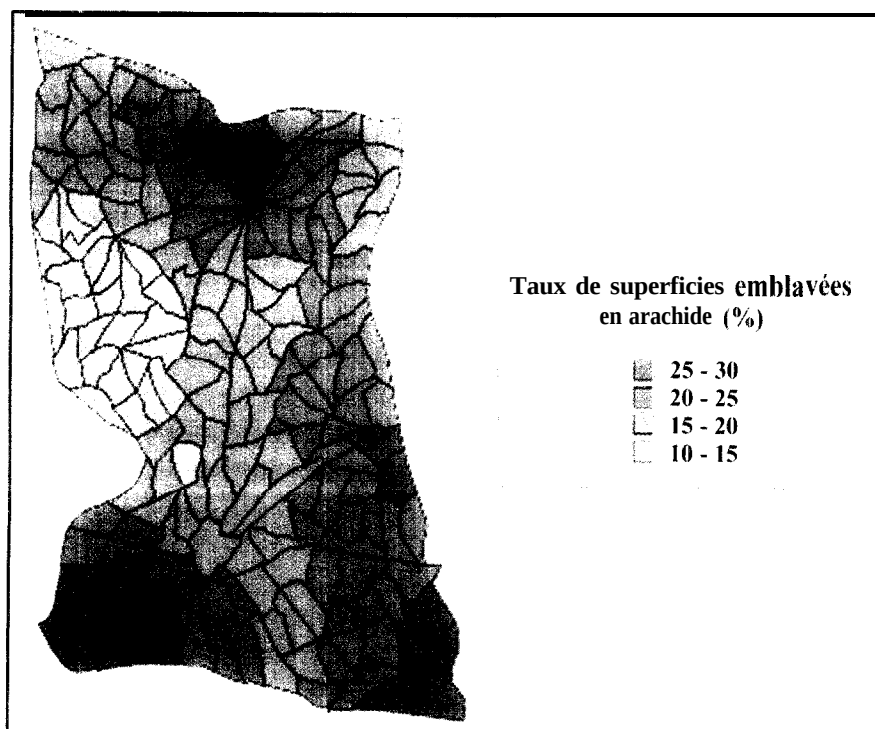


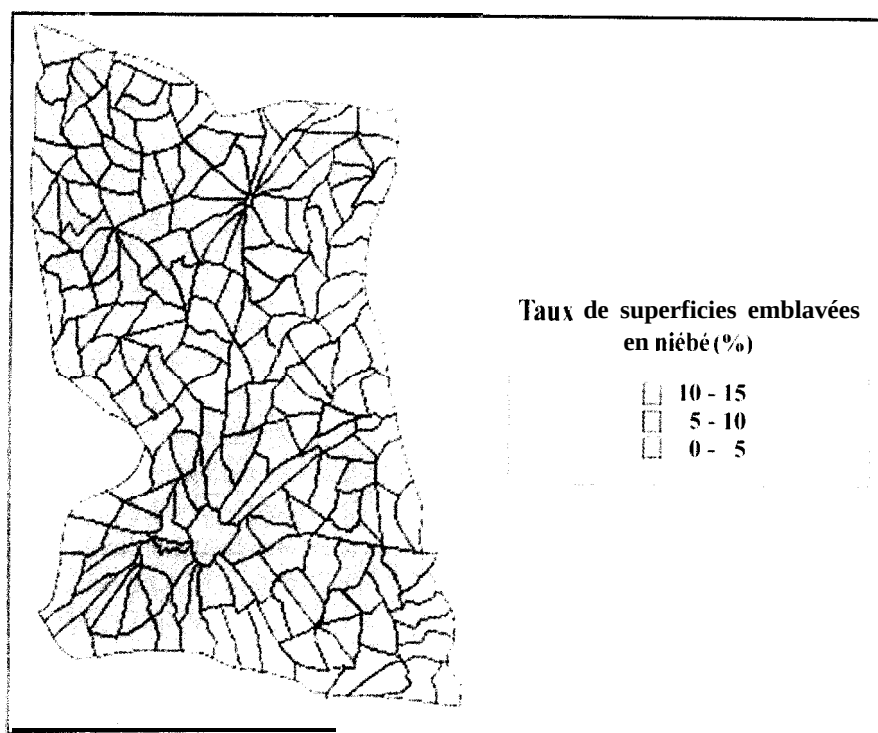
Figure 13 : Taux d'occupation en mil, département de Diourbel, Ceraas 1997.

Le mil, principale céréale cultivée dans la zone, est très peu représenté dans le Nord et le Nord-Est. Sur l'ensemble du département, il couvre une superficie emblavée totale de 37 900 ha, soit **29,4 %** de l'espace agricole et une réduction de 50 % par rapport à l'hivernage 1996. L'épisode sec survenu au mois de juillet et les attaques des plantules par les sauteriaux (selon enquête en milieu paysan) expliquent cette faible représentation (Figure 13).



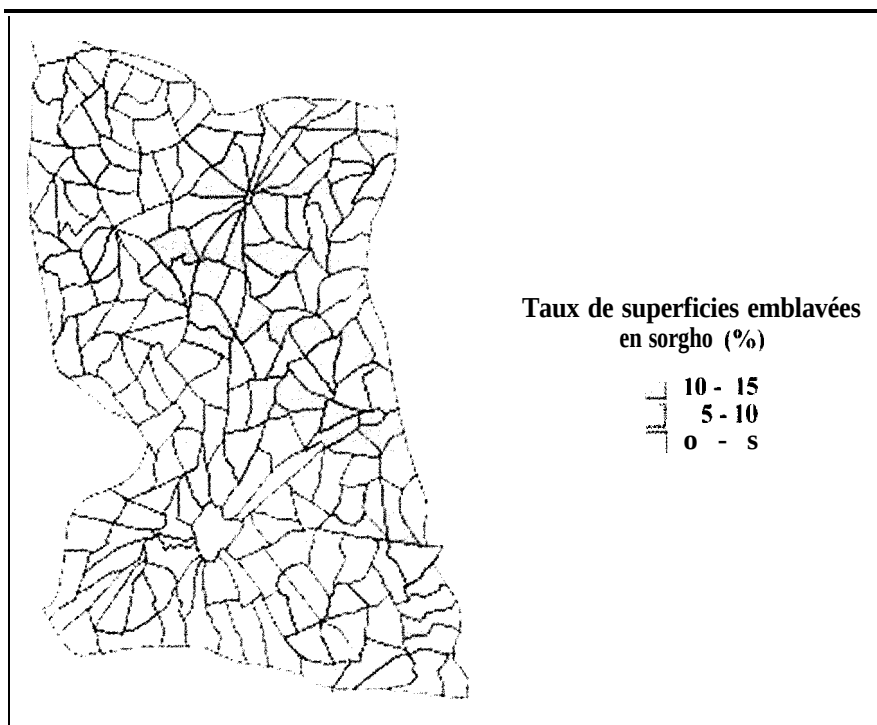
L'arachide est la principale légumineuse à graines cultivée dans le département. Elle présente une répartition spatiale globalement homogène. Cette culture occupe une superficie emblavée estimée à 26 300 ha, soit 21 % de l'espace agricole. Au cours de cet hivernage, l'installation des semis d'arachide s'est faite avec succès en dépit de la sécheresse du début de cycle (Figure 14).

Figure 14 : Taux d'occupation en arachide, département de Diourbel, Ceraas 1997.



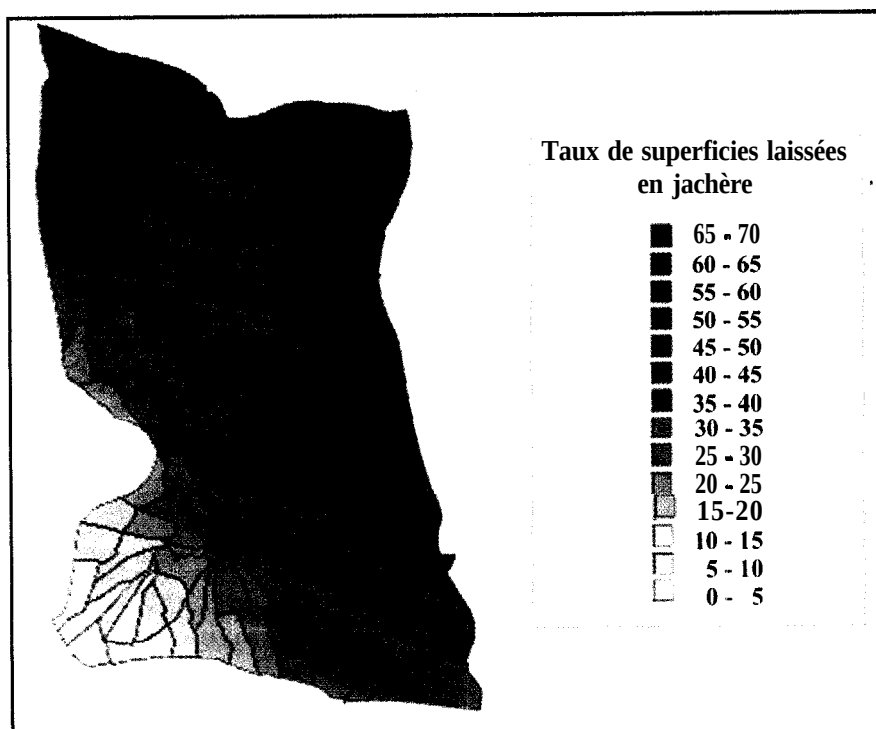
Le niébé est la seconde légumineuse cultivée dans ce département. Ceci explique son faible taux d'occupation, soit 9 % de l'espace agricole. Cependant, la culture du niébé est relativement plus fréquente dans le Nord-Est où elle constitue une culture de substitution au mil (Figure 15).

Figure 15 : Taux d'occupation en niébé, département de Diourbel, Ceraas 1997.



Le sorgho, comme le niébé, constitue dans le Nord-Est une culture de substitution au mil (Figure 16).

Figure 16 : Taux d'occupation en sorgho, département de Diourbel. Ceraas 1997.



Les espaces agricoles non cultivés (jachères et terres incultes) représentent une surface estimée à plus de 48 000 ha, soit 37 % des terres du département. Comme le mil, la jachère a une répartition très hétérogène. Les taux d'occupation moyens des jachères passent de 5 - 10 % dans le Sud-Ouest à plus de 50 % dans l'extrême Nord et le quart Nord-Est. Cet accroissement est consécutif à l'échec des semis de mil dans ces secteurs (Figure 17).

Figure 17 : Taux d'occupation en parcelle.~ non cultivée., département de Diourbel. Ceraas 1997

3.3 Rendements de l'arachide

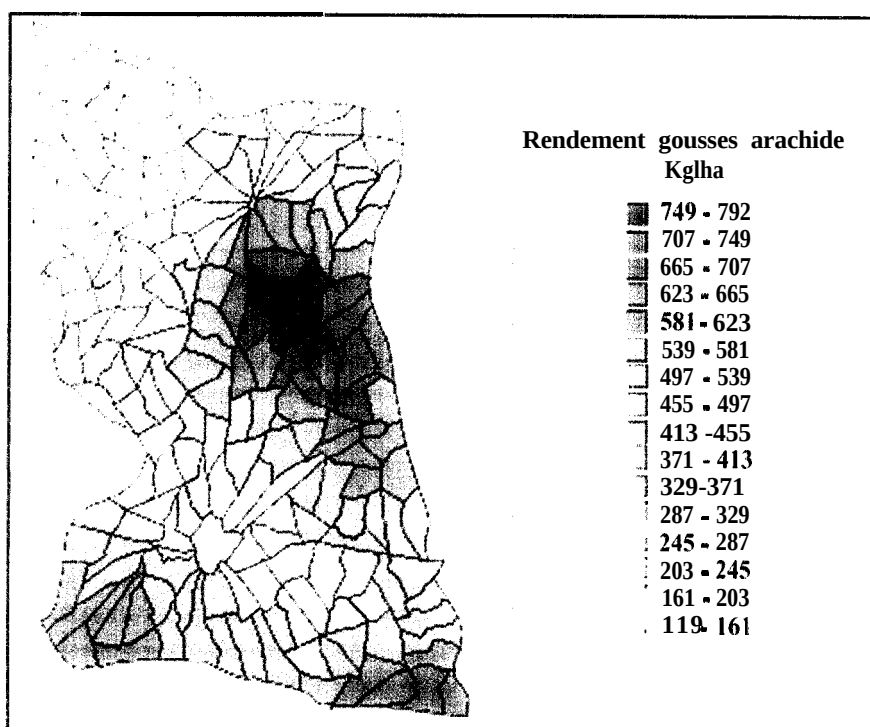


Figure 18 : Rendements en gousses d'arachide, département de Diourbel, Ceraas 1997.

Les rendements moyens en gousses d'arachide sur le département de Diourbel sont estimés à 485 Kg/ha soit une baisse de l'ordre de 10 % par rapport à la campagne 1996. Le Nord-Ouest, zone à semis tardifs (fin juillet à début août), enregistre les rendements les plus faibles. La dernière génération de semis n'y a pas bénéficié de conditions hydriques satisfaisantes durant les phases de flutification et de remplissage des gousses. Sur l'ensemble du département, la production totale estimée en gousses d'arachide est de 12 750 tonnes (Figure 18).

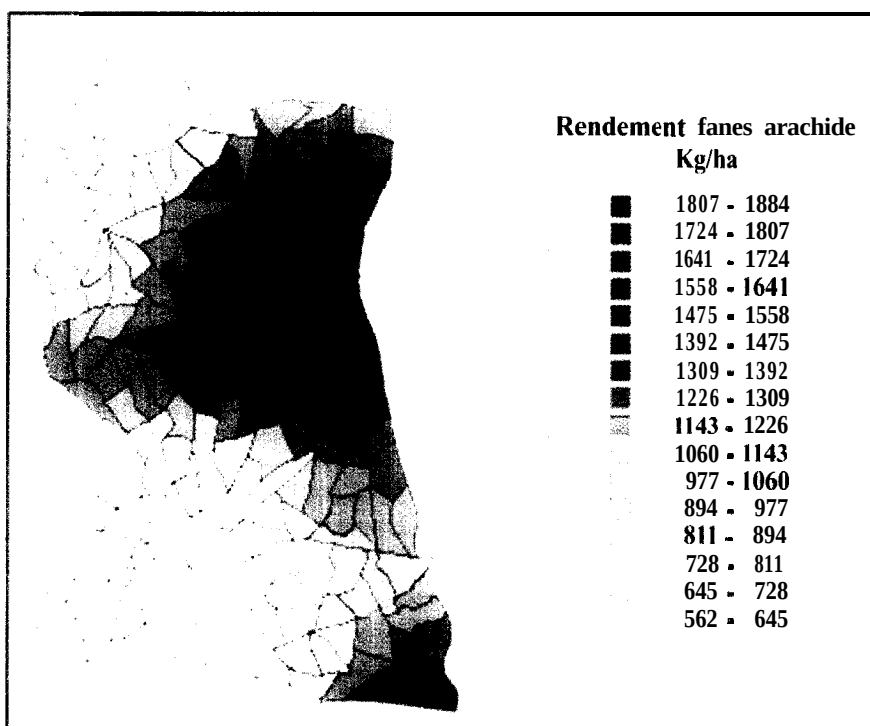


Figure 19 : Rendements en fanes d'arachide, département de Diourbel, Ceraas 1997.

Les rendements en fanes présentent une répartition spatiale similaire à celle des rendements en gousses. Ils varient de 600 Kg/ha dans le Nord-Ouest à plus de 1600 Kg/ha dans le Centre-Est et le Sud-Est.

Les plus faibles rendements en fanes correspondent aux semis les plus tardifs.

Les zones à dates de semis intermédiaires, qui n'ont pas connu de longue pause pluviométrique, enregistrent une production de fanes importante (Figure 19).

Conclusion

La combinaison des données de terrain et des données simulées des modèles-plante associées à des outils géographiques comme le SIG permet de se substituer aux techniques classiques de sondages démographiques et d'enquêtes statistiques jusque là utilisés par les organismes nationaux charge de l'estimation de la production agricole.

Les méthodes décrites ici ont l'avantage de déterminer précocement les rendements et la production agricole des principales cultures alimentaires et à moindre coût pour la structure qui choisit de les mettre en œuvre. Leur extension à l'échelle nationale et à la sous région doit être envisagée.

Bibliographie

- ANNEROSE D. J. M. . DIAGNE M. 1995. Modélisation et prévision agricole. Poster, CERAAS. Thiès.
- ANNEROSE D., DIAGNE M. 1990. Caractérisation de la sécheresse agronomique en zone semi-aride. Présentation d'un modèle simple d'évaluation appliqué au cas de l'arachide cultivée au Sénégal. *Oléagineux*, Vol. 45, n° 12. pp 547-554.
- ANNEROSE D., GUISSARD R., SOUMARE P. B., DIAGNE M. 1996. Une nouvelle approche d'estimation de la production agricole. Dossier CERAAS. 6 p.
- ANNEROSE D.J.M. 1996 Modélisation et applications pour le développement agricole. Dans : *Compte rendu de l'Atelier Buse Centre Arachide – CERAAS, « L'arachide cultivée en zones sèches stratégies et méthodes d'amélioration de l'adaptation à la sécheresse »*. ISRA/CNBA, Bambey, Sénégal. 17-20 Déc.
- ANNEZ C. 1997 Analyse spatiale de scénarios pluviométriques : de l'échelle départementale à l'échelle nationale. Rapport de stage effectué au CERAAS, Thiès, dans le cadre d'un mémoire de fin d'études (Université Libre de Bruxelles). 20 p.
- BOGGIO D SARR B. 1997. Système d'Information Géographique : validation de protocoles dans le département de Diourbel. Poster, CERAAS, Thiès.
- BOGGIO D., MARTIN R., SARR B. 1997. Expertise de la méthode de mesure des superficies agricoles par triangulation. Poster, CERAAS, Thiès.
- BOGGIO D., OLIVIER T., SARR B. 1997. Système d'Information Géographique : repérage d'unités d'échantillonnage par GPS. Poster, CERAAS, Thiès.
- CHAN HO TONG S. 1996. Méthodologie de collecte de données agricoles pour l'alimentation d'un système d'information géographique : campagne agricole 1996 Diourbel - Sénégal. Rapport de stage effectué au CERAAS, ISTOM, Paris. 32 p.
- CHAUVET P. 1994. Aide-Mémoire de Géostatistique. Cahiers de Géostatistique, fascicule 2. Ecole des Mines de Paris. 209 p.
- CSE. 1996. Utilisation de l'imagerie satellitaire à haute résolution. Rapport technique. 68 p.
- GUISSARD R. 1995. Contribution à la mise en place d'un système d'information géographique pour le suivi des cultures vivrières dans le bassin arachidier sénégalais, potentialités de la télédétection. Mémoire de fin d'études d'ingénieur agronome effectué au CERAAS, Université Libre de Bruxelles, Belgique 43 p.
- GUISSARD R. 1996. Résultats du suivi de la campagne agricole 1996 sur le Département de Diourbel : méthodologies et estimations. Rapport d'activités effectuées au CERAAS. 10 p.

FAOUORMADJIK. 1994. Modélisation des cultures. Application du modèle ARA.B.HY au suivi de la campagne arachidière 1994 – cas de la région de Diourbel au Sénégal. Mémoire de fin d'études effectué au CERAAS, ENCR Bambey. 43 p.

MARONE E. 1994. Etude des relations hydriques entre le sol et la plante chez l'arachide pour une meilleure définition des concepts de sécheresse et de stress hydrique. Mémoire probatoire. ISRA. 54 p.

MARTIN R. 1997. Expertise de la méthode de mesure des superficies par triangulation. Mémoire de fin d'études effectué au CERAAS, ISTOM, Paris. 68 p.

MATHIEU C. 1990. Contribution à la modélisation de la croissance de l'arachide au Sénégal (*Arachis hypogaea* L.). Mémoire de fin d'études effectué au CERAAS, ENITA, Dijon. 44 p.

MBAYE M M. 1997. Gestion de données de mesures de superficies par triangulation. Mémoire de fin d'études effectué au CERAAS, DIT Information Gestion, ESP/UCAD. 44 p.

OLIVIER T. 1997. Etudes des protocoles de terrain et d'outils informatiques pour une nouvelle méthodologie de découpage géographique basée sur l'utilisation du GPS : mise en place d'une base aréolaire le sondage sur le département de Diourbel. Mémoire de troisième cycle D.E.S.S. effectuée au CERAAS, Université Jean Moulin. Saint-Etienne. 81 p.

ORSATTI X. 1997. Mise en place d'une base de données associée à la modélisation des cultures et génération automatique de cartes. Mémoire de troisième cycle DESS effectué au CERAAS, CNAM, Montpellier. 58 p.

SAKO K. 1997. Autoparamétrisation de modèles de simulation du développement des cultures. Mémoire d'obtention du titre d'ingénieur effectué au CERAAS, IMERIR, Perpignan. 44 p.

SARR B., BOGGIO D., ANNEROSE D., ROY-MACAULEY H. 1998. Approach in modelling environmental factors and genotype interaction : a case study of millet (*Pennisetum Glaucum*). In : *European society of Agronomy. 5th ESA Congress*, (Nitra, Rep. Slovaque, 28 Juin - 3 Juillet 1998).

SAUTEREAU O. 1994. Suivi du bilan hydrique et du développement agrophysiologique de 5 variétés d'arachide en vue d'alimenter en données nouvelles le modèle de croissance Ara.B.Hy. Mémoire de fin d'études effectué au CERAAS, ISTOM, Paris. 23 p.

STAUB J. 1997. Etude de l'intégration d'une composante socio-économique au SIG de prévision des rendements du département de Diourbel. Mémoire de fin d'études effectué au CERAAS, ISTOM, Paris 35p.

SYLLA Y. C. 1995. Dossier d'analyse provisoire du modèle de simulation Ara.B.Hy version argentine 1995 dénommée Ara.B.Hy version 2. 1. CERAAS, Thiès. 52 p.

SYLLA Y. C. 1997. Gestion de données agro-climatiques et génération automatique de cartes dossier d'analyse provisoire du stage de Xavier Orsatti. CERAAS, Thiès. 5 p.

SYLLA Y. C., BOGGIO D. 1997. Autoparamétrisation de modèles de simulation du développement des cultures dossier d'analyse provisoire du stage de Kadidia Sako. CERAAS, Thiès. 10 p.

TEMARAS. 1997. Contribution au suivi des rendements de l'arachide dans le département de Diourbel (Sénégal) : enquête par sondage et interpolation géographique. Mémoire de fin d'études effectuée au CERAAS, Université Libre de Bruxelles, Belgique. 145 p.

WIGTON W.H. 1991. Rapport de mission auprès du CSE, non publié. Août-Septembre.



**Centre d'Etude Régional pour
l'Amélioration de l'Adaptation à la
Sécheresse.**

BP 3320 Thiès Escalé, Sénégal.

Tel : (+221) 951 49 93/94

E mail : ceraas@telecomplus.sn



**Institut Sénégalais de Recherches
Agricoles / Centre National de
Recherches Agronomiques.**

RP 53 Bambey, Sénégal.

Tel : (+221) 973 60 50/51

E mail : isracnra@telecomplus.sn



**Conférence des Responsables de
Recherche Agricole en l'Afrique de
l'Ouest et du Centre.**

BP 823 7 Dakar Yoff, Sénégal.

Tel : (+221) 825 96 18

E mail : secorafa@telecomplus.sn



**Centre Technique de Coopération Agricole
et Rurale (ACP-UE).**

Postbus 380, 6700 AJ Wageningen, Pays-Bas

Tel : (+31) (0) 317-467100

E mail : cta@cta.nl