
**DES INTERUNIVERSITAIRE EN GESTION DES RISQUES
NATURELS**

**Prévision de la production nationale
d'arachide au Sénégal à partir du modèle
agrométéorologique AMS et du NDVI**

Présenté par :

Amani Louis KOUADIO

PROMOTEUR

Dr Bernard TYCHON

Année académique 2006-2007

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	I
REMERCIEMENTS.....	II
RESUME.....	III
SIGLES	IV
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES CARTES	V
LISTE DES TABLEAUX	VI
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : CONTEXTE DE L'ETUDE.....	3
1.1 CARACTERISTIQUES DU MILIEU NATUREL DU SENEGAL	3
1.1.1 <i>Climat du Sénégal</i>	3
1.1.2 <i>Relief et hydrographie</i>	6
1.1.3 <i>Végétation</i>	6
1.2 PLACE DE L'ARACHIDE DANS L'ECONOMIE NATIONALE SENEGALAISE.....	8
1.3 ASPECTS PYTHOTECHNIQUES DE LA CULTURE DE L'ARACHIDE.....	9
1.3.1 <i>Sol</i>	9
1.3.2 <i>Température et Ensoleillement</i>	10
1.3.3 <i>Régime hydrique</i>	10
CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE	11
2.1 MATERIELS	11
2.1.1 <i>Modèle AgroMetShell</i>	11
2.1.2 <i>Modèle VAST (Vegetation Analysis in Space and Time)</i>	14
2.1.3 <i>Logiciels d'analyses des données</i>	16
2.1.4 <i>Statistiques agricoles du Sénégal</i>	16

2.2	METHODE.....	17
2.2.1	<i>Approche globale.....</i>	17
2.2.2	<i>Simulations dans AMS.....</i>	19
2.2.3	<i>Valeurs NDVI et sorties de VAST.....</i>	23
2.2.4	<i>Facteurs météorologiques</i>	23
2.2.5	<i>Régressions dans Statistica</i>	23
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....		25
3.1	PREVISIONS DES RENDEMENTS AU NIVEAU DEPARTEMENTAL	25
3.1.1	<i>Prévision à la troisième décade de septembre.....</i>	25
3.1.2	<i>Prévision à la troisième décade d'octobre</i>	29
3.2	PREVISION DE LA PRODUCTION NATIONALE D' ARACHIDE	32
3.2.1	<i>Prévision de la production nationale à la troisième décade de septembre</i>	32
3.2.2	<i>Prévision de la production nationale à la troisième décade d'octobre.....</i>	33
CONCLUSION.....		35
BIBLIOGRAPHIE		36
ANNEXES.....		39

AVANT-PROPOS

L'analyse des risques naturels a montré que pour leur bonne gestion il faut soit agir sur la composante aléa soit sur la composante vulnérabilité, ou alors sur les deux composantes à la fois.

En Afrique subsaharienne, avec les périodes de sécheresse qui ont frappé les différents pays depuis les années 1970, la vulnérabilité des populations, plus particulièrement des populations rurales, s'est amplifiée. Et quand bien même la tendance actuelle est de se tourner vers une agriculture plus diversifiée, il n'en demeure pas moins que les activités agricoles restent dominées par des cultures de rente, principales sources de revenus de ces populations rurales et maillon essentiel de l'économie de ces pays (exemple du cacao en Côte d'Ivoire, du coton au Mali, de l'arachide au Sénégal,...).

La mise à disposition d'outils de prévision de rendement et de production agricoles constitue un atout non négligeable dans la réduction de la vulnérabilité de ces populations. Ces outils, combinés à d'autres facteurs, sont une aide à la prise de décision en matière de politiques agricoles.

REMERCIEMENTS

Le travail que nous présentons n'a été rendu possible que par le soutien et les conseils de personnes dont nous voudrions qu'elles trouvent ici nos remerciements.

Nous voudrions remercier en premier lieu la Présidence de la République de Côte d'Ivoire qui nous a accordé une bourse d'études pour suivre cette formation.

Nous voudrions aussi remercier M. Bernard Tychon notre promoteur, qui nous a guidé tout au long de ce travail et qui n'a cessé d'être à notre écoute pour toutes les fois où nous avons sollicité son aide.

Nous remercions également l'ensemble du corps professoral de l'année académique 2006-2007 de l'Université de Liège et de la Faculté Agronomique de Gembloux, plus particulièrement MM. Ozer André, Paul Roger, Ozer Pierre et Mme von Frenckell, responsables de la formation de DES en Gestion des Risques Naturels.

Nous ne voudrions pas non plus oublier tous ceux qui nous ont aidé tout au long de notre formation et durant ce travail de fin d'études. Qu'ils retrouvent en ces lignes l'expression de nos remerciements.

RESUME

Au Sénégal, à l'instar de la plupart des pays subsahariens, l'agriculture est largement tributaire des conditions climatiques. L'agriculture paysanne occupe 60% de la population active et contribue pour 20% au PIB. Elle est dominée par plusieurs filières dont la filière arachide.

L'objectif de cette étude est de trouver un modèle de prévision de la production nationale d'arachide à la troisième décennie des mois de septembre et d'octobre. Ce modèle est basé sur la prévision du rendement de la culture au niveau départemental à partir des sorties du modèle agrométéorologique AgroMetShell, des données NDVI et de données météorologiques.

Cette étude qui constitue une première approche dans la prévision du rendement de l'arachide, montre que la relation trouvée entre le rendement à l'échelle départementale à la troisième décennie d'octobre et les variables explicatives fournit une bonne prévision du rendement de l'arachide à l'échelle nationale, avec un $R^2 = 0.55$ et une erreur de prédiction faible (RMSE = 28 kg/ha).

Mots-clés : *Prévision de rendement, AMS, NDVI, arachide, Sénégal.*

ABSTRACT

As many subsaharian countries, the agriculture of Senegal is widely dependent on the climate. This agriculture takes up 60% of active population and contributes at 20% of the GDP. It's dominated by many crops industries, whose groundnut industry.

The aim of this study is to find a forecasting model of the national production of groundnut at the third decade of September and October. This model is based on the yield forecasting at departmental scale with the outputs of the agrometeorological model AgroMetShell, NDVI data and other meteorological data.

This study which is one first approach in groundnut's yield forecasting, shows the relation between yield and the explanatory variables at the third decade of October provide a best forecast of the yield of groundnut at national scale ($R^2 = 0.55$ and RMSE = 28 kg/ha).

Key-words : *Yield forecasting, AMS, NDVI, groundnut, Senegal.*

SIGLES

CSE : Centre de Suivi Ecologique

DAPS : Direction de l'Analyse, de la Prévision et des Statistiques

DMN : Direction de la Météorologie Nationale

ETP : EvapoTranspiration Potentielle

FAO : Food and Agricultural Organization of United Nations

GMES : Global Monitoring for Environment and Security

GMFS : Global Monitoring for Food Security

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

NOAA-GAC : National Oceanic and Atmospheric Administration – Global Area Covered

PIB : Produit Intérieur Brut

RMSE : Root Mean Square Error

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : PLANTE D'ARACHIDE.....	9
FIGURE 2 : COURBE DU COEFFICIENT CULTURAL GENERALISE POUR L'APPROCHE PAR COEFFICIENT CULTURAL SIMPLE.....	13
FIGURE 4 : PRODUCTIONS MOYENNES NATIONALE ET DEPARTEMENTALE DE L'ARACHIDE (1986-2004).....	17
FIGURE 5 : APPROCHE GLOBALE METHODOLOGIQUE.....	19
FIGURE 6 : VALIDATION DU MODELE DE PREVISION DES RENDEMENTS	28
FIGURE 7 : RELATION ENTRE LE RENDEMENT MOYEN NATIONAL ET LE RENDEMENT OBSERVE A LA TROISIEME DECADE D'OCTOBRE	31
FIGURE 8 : COMPARAISON ENTRE LA PRODUCTION NATIONALE ESTIMEE ET LA PRODUCTION NATIONALE OBSERVEE POUR LA PERIODE DE 1986-2004 A LA 3^E DECADE DE SEPTEMBRE	32
FIGURE 9: COMPARAISON ENTRE LA PRODUCTION NATIONALE ESTIMEE ET LA PRODUCTION NATIONALE OBSERVEE POUR LA PERIODE DE 1986-2004 A LA TROISIEME DECADE D'OCTOBRE	33

LISTE DES CARTES

CARTE 1 : REGIONS CLIMATIQUES DU SENEGAL.....	4
CARTE 2 : NORMALES PLUVIOMETRIQUES SUR LA PERIODE 1961-1990 EN MM.....	5

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : COEFFICIENTS CULTURAUX ET DUREE DES STADES PHENOLOGIQUES DE L'ARACHIDE EN FONCTION DU STADE PHENOLOGIQUE.....	21
TABLEAU 2 : EXEMPLE DE FICHER D'ENTREE D'UN CALCUL DE BILAN HYDRIQUE DANS AMS POUR LA CULTURE D'ARACHIDE (SENEGAL, ANNEE 2001)	22
TABLEAU 3 : PREVISION DES RENDEMENTS AU NIVEAU DEPARTEMENTAL A LA 3^E DECADE DE SEPTEMBRE	25
TABLEAU 4 : MODELES DE PREVISION A L'ECHELLE DEPARTEMENTALE.....	27
TABLEAU 5 : RENDEMENTS MOYENS OBSERVE ET ESTIME (1986-2004) A LA 3^E DECADE DE SEPTEMBRE	28
TABLEAU 6: VARIABLES EXPLICATIVES DU RENDEMENT A LA 3^E DECADE D'OCTOBRE.....	30

INTRODUCTION

Le Sommet mondial sur l'alimentation organisé par la FAO en 1996 pour répondre d'une part aux nombreuses crises alimentaires affectant les pays les plus pauvres, et de l'autre répondre aux craintes exprimées par la communauté internationale quant à la capacité de l'agriculture de nourrir une population en constante augmentation, s'est fixé comme résolution de réduire de 400 millions le nombre de gens souffrant toujours de la faim d'ici à 2015 (HEIMO, 2004).

Comme les progrès enregistrés suite à ce sommet n'ont pas été notoires, un nouveau Sommet a été organisé à Rome en 2002 pour accélérer les mesures décidées lors du Sommet de 1996 et celles prises dans le cadre des objectifs du Millénaire. Le manque d'information crédible à la fois sur la nature des problèmes entraînant ou liés à l'insécurité alimentaire et aux famines, sur le nombre de gens qui en souffrent, et sur les stratégies locales de résistance aux chocs mises en oeuvre par les populations affectées (vulnérabilité) par les crises alimentaires sont à compter parmi les facteurs principaux qui expliquent la persistance de la malnutrition et la faim en Afrique. Il est à noter, dans ce contexte, que les systèmes d'information sur la sécurité alimentaire et la détection précoce des famines ne fonctionnent pas correctement, en grande partie du fait de la faible capacité des gouvernements des pays en voie de développement à assurer un suivi constant des facteurs agissant sur la sécurité alimentaire. Pourtant, de nouvelles avancées technologiques en matière d'observation de la terre sont maintenant disponibles. Elles présentent de nouvelles opportunités permettant de palier les insuffisances constatées au niveau des systèmes d'information existants.

Le projet GMFS a pour objectif principal d'utiliser précisément ces nouvelles avancées technologiques pour renforcer les capacités des gouvernements des pays africains à fournir des informations objectives et en temps réel sur l'état de la sécurité alimentaire. Il constitue l'un des projets du GMES Service Element, initiative du Joint European Commission et de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Plus spécifiquement donc, l'objectif du projet GMFS est de développer un service d'information sur la sécurité alimentaire en Afrique dérivé en partie des données fournies par les plus récents satellites de sorte à rendre plus efficace les politiques de lutte contre la faim et les programmes d'aide humanitaire en cas de crise. Son but principal est donc de renforcer les systèmes d'information existants tant au niveau global, régional ou national. Le projet GMFS vise à établir une capacité européenne de suivi de la sécurité alimentaire en Afrique en offrant un service de suivi opérationnel de la production agricole permettant de fournir des informations en temps réel sur les disponibilités en nourriture (www1).

En Afrique de l'Ouest, les activités du projet GMFS se déroulent essentiellement au Sénégal. Ce pays a été choisi car il est représentatif de la région sahélienne. Les bénéficiaires sénégalais du projet sont le Centre de Suivi Ecologique (CSE), la Direction de l'Analyse, de la Prévision et des Statistiques du Ministère de l'Agriculture (DAPS/MA) et la division de la météorologie nationale (DMN). Les services offerts par le projet sont essentiellement basés sur l'intégration d'information génériques (par exemple : indices de végétation) et spécifiques (par exemple : superficies emblavées, estimation des rendements et de la production, dégradation des ressources naturelles, zones inondées) obtenues grâce à une utilisation conjointe et intégrée des données fournies par les capteurs de basse, moyenne et haute résolution embarqués sur les satellites récents et des données issues d'enquêtes de terrain (enquêtes socio-économiques, sur la santé, sur la nutrition).

Les activités de ce projet ont déjà fourni des prévisions de rendement du mil pour la saison 2005 (BYDEKERKE, 2006), des prévisions des rendements du mil, du sorgho, du maïs et du niébé pour la 2^e décennie d'octobre 2006 (TYCHON et ROSILLON, 2006). Les prévisions du mil au niveau national en 2005 ont montré que la différence relative entre la production de mil prédite et les statistiques officielles est de 8%. Aussi l'évolution des rendements prédits de 1986 à 2003 suit-elle de près l'évolution des rendements de la FAO : $R^2 = 0.65$ et le RMSE = 47 kg/ha (TYCHON et ROSILLON, 2006). Ces céréales constituent une part importante dans l'agriculture sénégalaise. L'insécurité alimentaire et la pauvreté constituent des défis majeurs auxquels le Sénégal doit faire face. L'option est d'assurer la sécurité alimentaire par une production locale diversifiée et compétitive capable de promouvoir les revenus agricoles (l'agriculture paysanne occupant 60% de la population active et contribuant pour 20% au PIB (www2)), et qui sera complétée par des importations de produits alimentaires présentant un avantage comparatif sur les filières locales. Au nombre de ces filières on peut citer la filière arachide, la filière coton, la filière céréales (mil, maïs, sorgho et niébé), et la filière élevage.

La filière arachide demeure de loin la plus importante car pendant longtemps l'exportation principale du pays a été l'arachide et ses produits secondaires – huile et arachide sans coquille, lui apportant le prestige d'économie de monoculture. Malgré la crise qui frappe la filière depuis des années déjà, celle-ci constitue encore aujourd'hui une source de revenus non négligeable pour les populations rurales.

L'objectif de notre étude est de fournir un modèle de prévision de la production nationale de l'arachide pour la fin du mois de septembre et la fin du mois d'octobre. Ce modèle est basé sur les données agrométéorologiques, le NDVI et les données historiques des statistiques agricoles du Sénégal. Cette étude constitue un premier essai dans le cadre du projet GMFS au Sénégal.

Plus spécifiquement, il s'agira de prévoir le rendement de l'arachide à l'échelle de certains départements, puis de l'agréger au niveau national afin de pouvoir estimer la production nationale.

Pour mieux aborder cette problématique, le présent document se subdivisera comme suit : dans un premier temps nous présenterons le contexte de notre étude ; ensuite nous aborderons la méthodologie ; et pour finir nous présenterons les résultats et en ferons les discussions.

CHAPITRE 1 : CONTEXTE DE L'ETUDE

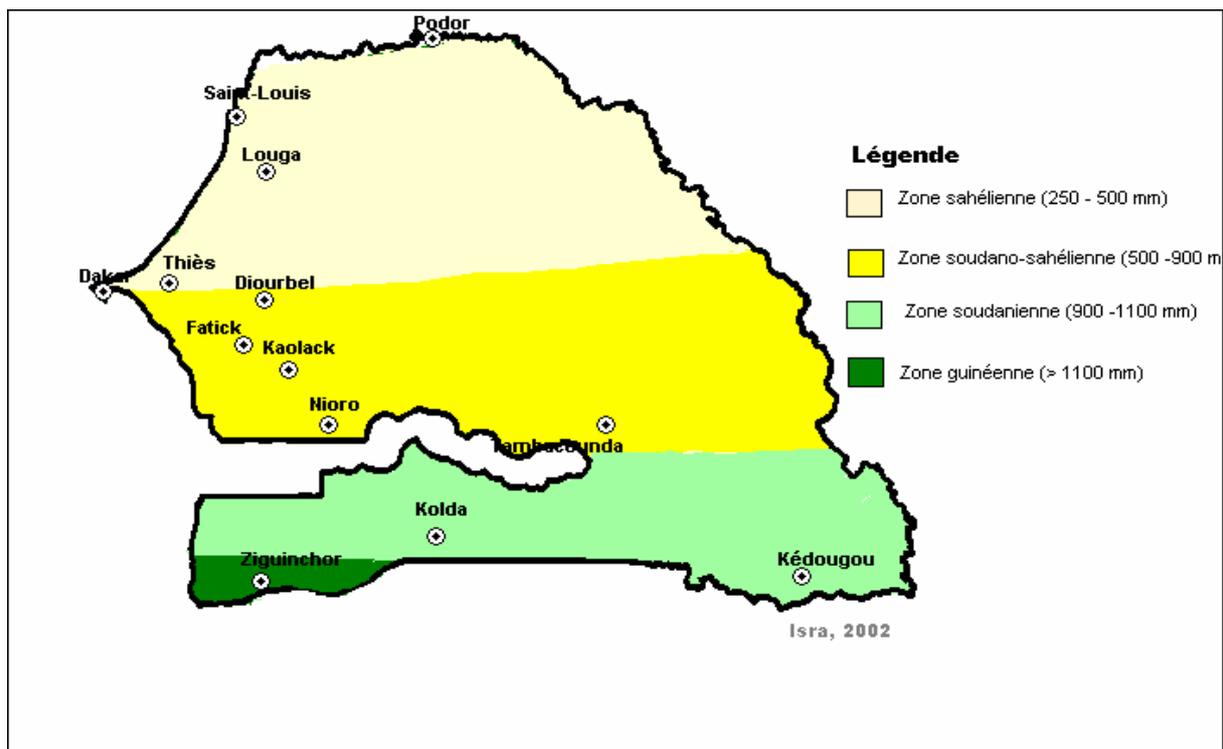
1.1 CARACTERISTIQUES DU MILIEU NATUREL DU SENEGAL

Le Sénégal est situé en Afrique de l'Ouest (entre 12°18' et 16°41' de latitude Nord, et 11°21 et 17°32' de longitude Ouest) et couvre une superficie de 196.722 km². Sa population est estimée à 11,4 millions d'habitants en 2004 (www2). Il est limité au nord par la Mauritanie, à l'est par le Mali, au sud par la Guinée et la Guinée Bissau, à l'ouest par la Gambie, et par l'Océan Atlantique sur une façade de 500 km.

1.1.1 Climat du Sénégal

Le Sénégal est soumis à un climat tropical caractérisé par deux saisons principales : une saison sèche de novembre à juin, et une saison des pluies (hivernage) de juillet à la mi-octobre. On distingue quatre zones climatiques (carte 1), la pluviosité moyenne s'accroissant régulièrement quand on se déplace du nord vers le sud (GAYE et NDIONE, 2000) :

- la région Sahélienne : le *nord sahélien* (100 à 300 mm) et le *sud-sahélien* (300 à 500 mm) ;
- la région Nord-Soudanienne : 500 à 800 mm ;
- la région Sud-Soudanienne : 800 à 1200 mm ;
- la région Soudano-Guinéenne : plus de 1200 mm.

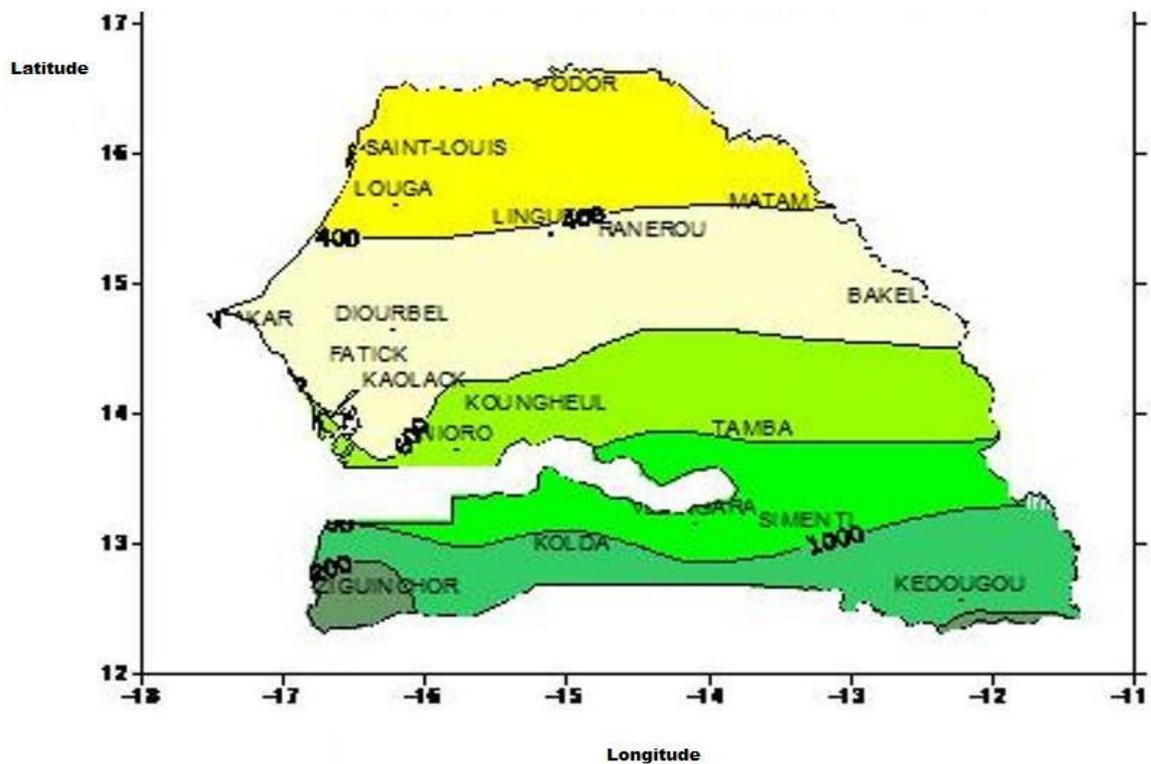


Carte 1 : Régions climatiques du Sénégal

1.1.1.1 Précipitations

L'année climatique est divisée en deux saisons principales par le critère pluviométrique. La saison dite sèche n'est vraiment sèche que dans l'intérieur du pays, tandis que sur le littoral, qui bénéficie d'une humidité relative élevée, la saison est précisément non pluvieuse.

La saison sèche s'étend de 7 mois (novembre-mai) au sud du pays à 10 mois (octobre-juillet) à l'extrême nord. La saison pluvieuse (hivernage) dure de 5 mois (juin-octobre) en Casamance à 2 mois (août-septembre) dans les régions septentrionales de la vallée du Sénégal. Les quantités d'eau reçues évoluent suivant une disposition similaire : entre 1 700 et 250 mm par an de la pointe méridionale à la frontière mauritanienne. La carte 2 montre en exemple la répartition des isohyètes sur une période de 30 ans (1961-1990). A l'instar de tous les pays sahélo-soudaniens, le climat sénégalais se caractérise par une grande variabilité des précipitations d'une année à l'autre, variabilité d'autant plus redoutable que la moyenne annuelle est plus faible ; plus leur total annuel s'amenuise, plus les pluies sont incertaines et irrégulières et de plus leur déficit est grave.



Carte 2 : Normales pluviométriques sur la période 1961-1990 en mm

(Source : DIAGNE et al., 2003)

1.1.1.2 Température

En raison de la désertification qui s'étend au sud de Saint-Louis, le climat s'est nettement réchauffé, se rapprochant de celui de la Mauritanie. Les températures moyennes annuelles oscillent entre 18 et 26°C sur le littoral et entre 24 et 30°C à l'intérieur du pays pendant la saison sèche. Pendant la saison des pluies, les températures oscillent alors entre 25 et 30°C sur le littoral et entre 30 et 40°C à l'intérieur du pays avec des maxima de 50°C (www3).

Les plus forts écarts de température ont lieu en saison sèche où les nuits sont froides et les journées parfois torrides.

1.1.2 Relief et hydrographie

Le Sénégal est presque entièrement compris dans une plaine littorale qui se prolonge au nord vers la Mauritanie, au sud en direction de la Guinée-Bissau. Le littoral, de part et d'autre de la presqu'île du Cap-Vert, apparaît comme une côte basse, rectiligne et sableuse. Au sud de Joal, la côte, qui se révèle plus sinueuse, est marquée par les vasières créées à l'embouchure des fleuves Saloum et Casamance. Les altitudes restent inférieures à 100 m jusqu'aux limites sud-orientales du pays, où, à 600 km de la côte, les "montagnes", à la frontière guinéenne, culminent à 581 m.

Le Sénégal est parcouru par cinq fleuves. Le plus important est, au nord, le fleuve Sénégal (1700 km), qui irrigue des milliers d'hectares de terres cultivées. Le fleuve Gambie traverse le parc national du Niokolo-Koba puis pénètre dans l'État qui porte son nom. Au sud, le fleuve Casamance est navigable jusqu'à Ziguinchor. Avec leurs nombreux bras de mer et leur centaine d'îles, le Sine et le Saloum sont fréquentés par les touristes, les pêcheurs et les chasseurs.

1.1.3 Végétation

L'absence de reliefs importants et le développement limité du réseau hydrographique donnent aux facteurs climatiques un rôle prépondérant dans la répartition des paysages végétaux du Sénégal. La première conséquence est une disposition zonale des grands domaines phytogéographiques, interrompue seulement par quelques formations azonales dans les vallées et le long de la côte. La seconde est une évolution des paysages par transitions insensibles, conforme à la croissance progressive des pluies des pluies du nord au sud du pays. Partout dominant spontanément des paysages boisés, qu'il s'agisse d'arbustes épineux dans les régions les plus sèches, de peuplements arborés dans la zone soudanienne ou de forêts épaisses dans le domaine subguinéen. On peut distinguer trois grands domaines (www3) :

1.1.3.1 Le domaine sahélien

Parmi les acacias qui caractérisent ce domaine, le seing (*Acacia raddiana*) l'emporte, notamment sur les sols sablonneux du Cayor. S'y associent fréquemment le verok (*Acacia senegal*) qui fournit la gomme, le soump (*Balanites aegyptiaca*) aux fruits oléagineux, le jujubier (*Zizyphus mauritaniana*) et, à l'approche des villages, le baobab (*Andansonnia digitata*). Au sol, le tapis herbacé, desséché dès le mois de novembre, est composé de graminées annuelles où domine le cram-cram (*Cenchrus biflorus*). Vers le sud, la transition est faite par savanes arborées où l'emportent le kad (*Acacia albida*) dans les régions les plus intensivement cultivées et des taillis de Combrétacées (en

particulier de rât) dans le Ferlo. Le sorour (*Acacia seyal*), souvent associé au baobab, forme des peuplements denses sur les sols limono-calcaires.

1.1.3.2 Le domaine soudanien

C'est par excellence celui de la savane sous différentes physionomies. De beaux arbres, tels que le caïcedrat (*Khaya senegalensis*), le vèn (*Pterocarpus erinaceus*) et le néré (*Parkia biglobosa*), en formations ouvertes surplombent un tapis de grandes herbes. Dans la vallée apparaissent des peuplements homogènes de rôniers (*Borassus aethiopum*) et parfois de bambous (*Oxytenanthera abyssinica*). Une maigre savane herbeuse couvre les cuirasses ferrugineuses qui affleurent en Haute Gambie. La transition avec le domaine subguinéen est marquée par l'apparition, en Moyenne Casamance, d'essences préforestières comme le satan (*Daniellia oliveri*) et le tali (*Erythrophleum guineense*).

1.1.3.3 Le domaine subguinéen

Limité à la basse-Casamance, il est occupé à l'état naturel par une forêt dense à feuilles caduques dominée par les fûts élancés du mampatan (*Parinari excelsa*) et de l'iroko (*Chlorophorar regia*), auquel sont associés le copalier et surtout le palmier à huile (*Elaeis guineensis*). Ne subsistant que sous forme d'îlots, cette forêt a progressivement fait place, sous l'action de l'homme, à la palmeraie qui couvre désormais tout le domaine des cultures, les champs des plateaux comme les rizières des vallées.

1.1.3.4 Les groupements azonaux

Ils se localisent dans des milieux où règnent des conditions hydrologiques particulières. La forêt de gonakiés (*Acacia nilotica*) caractérise la vallée inondable du Sénégal. Des groupements d'*Elaeis guineensis* survivent au nord du Cap-Vert, dans les dépressions interdunaires (les niayes) qui s'échelonnent le long de la côte. Les estuaires du Saloum et de la Casamance sont colonisés par des peuplements touffus de palétuviers (*Rhizophora racemosa*) qui forment un écosystème littoral adapté à l'eau saumâtre : la mangrove.

1.2 PLACE DE L'ARACHIDE DANS L'ECONOMIE NATIONALE SENEGALAISE

L'agriculture sénégalaise, essentiellement basée sur l'arachide comme principale culture de rente, est, depuis le début des années 70, dans une profonde crise qui n'a pas fini d'avoir de graves répercussions sur l'économie nationale dont elle était le moteur et la principale source de devises. Véritable composante de l'identité et de l'histoire du Sénégal, l'huile d'arachide est également une fierté nationale, tant elle joue un rôle central dans son commerce. La culture de l'arachide date de l'époque de la colonisation. Cette monoculture extrême a évolué avec trois facteurs – l'accès libre aux territoires cultivables, l'offre de main-d'oeuvre suffisamment élevée et de bonnes infrastructures pour cette époque-là. 93% des arachides ont été cultivées au long des chemins de fer Dakar-Niger (direction Tambacounda) et Dakar-St. Louis. Cependant, cette expansion a supprimé les autres cultures alimentaires comme le riz et le mil dans les zones arachidières et les a réalloués dans les zones moins favorables.

Vers 1930 deux tiers de la population s'engageait dans la production arachidière, qui était assez profitable, puisque les compagnies offraient un prix à la production élevé. Le pays est donc sorti de la colonisation avec une économie très spécialisée en arachides (66% des exportations en 1960). Après l'indépendance le Sénégal a profité des conditions favorables le climat et l'introduction de nouvelles semences. Mais les conditions climatiques défavorables des années 1970, la continuation d'agriculture extensive ayant conduit les surfaces cultivables à épuisement et à stagnation, ont plongé la filière dans une crise qui perdure jusqu'aujourd'hui.

La production mondiale arachidière enregistre une progression soutenue : 23 millions de tonnes (MT) en 1990, 28 MT en 1995, 34 MT en 2001 (BARRAUD et MAURY, 2004). Les principaux producteurs sont en Asie 66% (Chine et Inde), Afrique 25% (Sénégal, Soudan), Amérique du Nord et du Centre 6% (USA), Amérique du Sud 4% (Argentine). Les grands pays exportateurs actuels ne pourront pas forcément, pour des raisons diverses, couvrir l'augmentation de la demande : culture stationnaire et réglementée aux USA, demande interne en croissance en Chine et en Inde, climatologie de fin de cycle en Argentine ou qualité sanitaire insuffisante au Vietnam et en Inde.

Une opportunité à saisir pour les pays africains, dont le Sénégal, qui ont déjà une longue tradition arachidière. Ces derniers devront cultiver des variétés adaptées aux normes du marché international (taille, forme, couleur des graines) et satisfaire aux réglementations sanitaires notamment au plan des aflatoxines (labellisation des produits par des laboratoires accrédités).

1.3 ASPECTS PYTHOTECHNIQUES DE LA CULTURE DE L'ARACHIDE

L'arachide (*Arachis hypogea* L.) cultivée est une légumineuse annuelle de 30 à 70 centimètres de haut, érigée ou rampante (figure 1). La partie aérienne est portée par une tige principale, toujours érigée, et deux ramifications latérales primaires issues du collet de la plante. La base de l'ovaire fécondé s'allonge pour former un pédoncule appelé gynophore qui s'enfonce dans le sol où se forme le fruit (gousse) composé d'une coque indéhiscente contenant de 1 à 4 graines. Le système racinaire pivotant permet d'explorer un volume de sol important. Il porte des nodosités fixatrices d'azote atmosphérique, caractéristiques des légumineuses, qui permettent à la plante d'enrichir le sol en azote lorsque les conditions sont par ailleurs satisfaisantes.

Au Sénégal, la culture de l'arachide s'étale sur les mois de Juin à Novembre-décembre compte tenu de la variabilité spatio-temporelle au niveau de la pluviométrie.

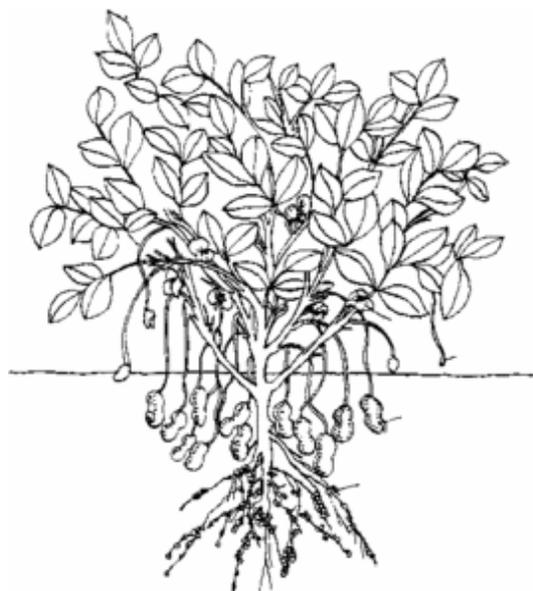


Figure 1 : *Plante d'arachide*

(source <http://agora.qc.ca>)

1.3.1 Sol

Les sols doivent être suffisamment meubles ou ameublis pour permettre la pénétration des gynophores puis l'arrachage des gousses mûres. De plus, l'arachide requiert des sols bien drainés et aérés car les échanges respiratoires des gousses en formation sont élevés. Les sols à texture fine, meubles et perméables, et en particulier les sols sableux, sont ceux qui conviennent le mieux. La

culture d'arachide sur sols lourds et argileux n'est conseillée que si le recours à la mécanisation et l'irrigation au moment opportun sont possibles.

L'arachide est sensible à la salinité et à l'acidité des sols. Les sols très acides (pH inférieur à 5) ou déficients en CaO peuvent induire des toxicités aluminiques ou ferriques ; l'acidité inhibe le développement des bactéries fixatrices d'azote, ce qui est décelable à l'aspect chlorotique du feuillage et à l'absence de la coloration rouge, à l'intérieur des nodosités, qui caractérise la présence de bactéries actives.

1.3.2 Température et Ensoleillement

Les températures inférieures à 15°C et supérieures à 45°C ralentissent ou bloquent la croissance, l'optimum se situant entre 25 et 35°C.

L'arachide est peu sensible à la photopériode, mais les longs jours ont un effet positif sur la productivité : les semis précoces (lorsque la pluviométrie ou l'irrigation le permet) seront donc préférés. Les déséquilibres se traduisent fréquemment par un rapport fanes/gousses défavorable, que l'on observe également en zone équatoriale et dans les cultures sous plantations arbustives, lorsque l'ensoleillement devient limitant.

1.3.3 Régime hydrique

L'arachide présente des stades de sensibilité variables à la sécheresse : les besoins en eau sont élevés au moment de l'imbibition de la graine, qui une fois la germination amorcée craindra l'excès d'eau. La période de floraison-formation des gousses (30-70 jours après semis) correspond à une phase de sensibilité à la sécheresse, alors que la phase finale de maturation sera favorisée par une sécheresse relative, des pluies à ce stade pouvant en outre provoquer des germinations sur pied chez les variétés non dormantes. Une pluviométrie comprise entre 500 et 1 000 mm pendant la saison de culture permet généralement d'obtenir une bonne récolte, mais la bonne répartition des pluies en fonction du cycle de la variété est plus importante que le total pluviométrique. Selon SCHILLING (1997) des rendements supérieurs à 1 tonne/ha en grande culture ont été obtenus au nord du Sénégal, sous 350 mm de pluies concentrées sur trois mois, avec la variété hâtive tolérante à la sécheresse 55-437. En période de stress hydrique l'irrigation d'appoint peut conduire souvent à une amélioration substantielle (y compris qualitative) au prix d'un investissement minime. Mais dans le cas de l'agriculture traditionnelle pratiquée au Sénégal, c'est plutôt l'utilisation de variétés tardives à forte productivité qui sera alors préférée.

CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE

2.1 MATERIELS

L'étude s'est basée sur les données historiques agricoles de l'arachide du Sénégal. Les différents logiciels utilisés dans le cadre de cette étude sont le modèle agrométéorologique AgroMetShell (AMS, version 1.57), le logiciel VAST (Vegetation Analysis in Space and Time), le logiciel Windisp 5.1, et les logiciels Statistica 7.1 et Microsoft Excel 2007.

2.1.1 Modèle AgroMetShell

2.1.1.1 Principe général

AMS est un outil développé spécialement par la FAO et qui permet le suivi agrométéorologique des cultures. Son développement a débuté dans les années 1980 afin de trouver un outil qui permettrait d'estimer les rendements dans une optique d'alerte précoce. A l'époque, le prédicteur principal de rendement était le WRI (Water Requirement Index), mais avec le développement de AMS d'autres paramètres issus du modèle de bilan hydrique (CSSWB : Crop specific soil water balance) peuvent à présent être utilisés pour étudier la corrélation entre les conditions pluviométriques et le rendement.

Le CSSWB model est un modèle de bilan hydrique simple utilisé pour estimer l'impact des conditions climatiques sur les cultures. Il constitue le cœur du fonctionnement de AMS. Dans ce modèle, le bilan hydrique est calculé pour un pas de temps décadaire en général. Le pas de temps de 10 jours (une décade) est suffisant pour estimer avec une précision acceptable le bilan hydrique dans un but agrométéorologique.

L'équation est la suivante :

$$W_t = W_{t-1} + R - ET_c - (r + i) \quad (1)$$

Avec : W_t , la quantité d'eau stockée dans le sol au moment t

W_{t-1} , la quantité d'eau stockée dans le sol à la fin de la période précédente t-1

R, la quantité de pluie cumulée sur la période de temps t (souvent une décade)

ET_c , l'évapotranspiration potentielle de la culture sur la période t

r, la perte d'eau due à l'écoulement sur la période t

i, la perte d'eau liée à la percolation profonde sur la période t

Généralement, on ne tient pas compte de la pluie effective dans ce modèle. La pluie effective est estimée à 100%. Seul l'apport d'eau lié à la pluie est considéré (et pas l'apport d'eau lié au ruissellement). L'équation (1) peut alors être réduit à :

$$W_t = W_{t-1} + R - ET_c \quad (2)$$

Le contenu en eau du sol, les termes W_t et W_{t-1} de l'équation (2), représente la quantité d'eau stockée dans la zone racinaire de la plante. L'humidité du sol est supposée nulle au début de la saison de croissance. Cette supposition est peu contraignante, particulièrement au Sénégal où la période de croissance est précédée d'une longue saison sèche. Si W_t est supérieur à la capacité de teneur en eau facilement disponible du sol alors il y a un excès d'eau pour la période t. Si W_t est inférieure à la capacité de teneur en eau facilement disponible du sol, il y a un déficit d'eau pour la période t.

L'évapotranspiration potentielle reprise dans les équations (1) et (2) représentant les besoins en eau de la plante est donnée par :

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (3)$$

Avec ET_c , l'évapotranspiration réelle de la culture (mm/unité de temps)

K_c : coefficient cultural

ET_0 : évapotranspiration de référence (mm/unité de temps)

ET_c représente l'évapotranspiration maximale que peut atteindre une culture dans un contexte climatique donné. En fonction des pratiques culturales et de l'absence ou la présence de stress (hydrique, salin,...) l'évapotranspiration réelle s'écarte plus ou moins de cette valeur.

Le coefficient cultural K_c intègre les 4 principales caractéristiques qui différencient la culture de la surface de référence à savoir la hauteur, l'albédo, la résistance de la canopée et l'évaporation du sol exposé au soleil.

La figure 2 ci-après représente les changements du coefficient cultural au cours du cycle de croissance. La forme de la courbe représente les changements dans la végétation et la couverture du sol pendant le développement de la plante et la maturation de la plante qui affecte le rapport de ET_c sur ET_0 . A partir de cette courbe, le facteur K_c et donc ET_0 peut être dérivé pour n'importe quelle période du cycle de croissance.

Peu de temps après le semis, ou peu de temps après l'initiation des nouvelles feuilles dans le cas de plantes pérennes, la valeur de K_c est faible, souvent inférieur à 0.4. K_c commence à augmenter de la valeur initiale de K_c , K_c ini, au début du développement rapide de la culture et atteint une valeur maximale, K_c mid, lorsque la plante est à son niveau de développement maximal. Pendant la dernière période du cycle, comme les feuilles entrent en sénescence, K_c commence à diminuer jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur plus basse, K_c end, en fin de période de croissance.

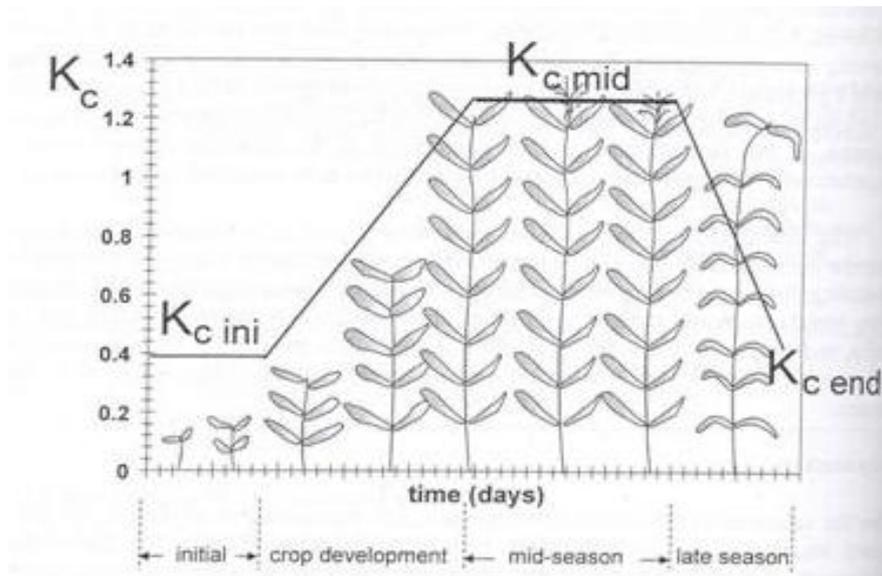


Figure 2 : Courbe du coefficient cultural généralisé pour l'approche par coefficient cultural simple

(Source : Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper, 56)

2.1.1.2 Données d'entrée de AMS

Les données d'entrée utilisées sont l'évapotranspiration potentielle et la pluviométrie réelle.

AMS simule l'ensemble du cycle de croissance des cultures depuis le semis de la plante à la récolte. Des données pluviométriques sur toute la longueur du cycle sont donc nécessaires. Dans le processus de simulation, les données pluviométriques postérieures à la date de prévision sont remplacées par les données pluviométriques normales. En conséquence, plus les prévisions de rendement sont réalisées tardivement, meilleure est la simulation dans AMS. AMS fonctionne uniquement si le taux de données pluviométriques réelles utilisées pour la simulation est supérieur à 40%. Les simulations AMS sont réalisées sur base de données pluviométriques réelles uniquement.

2.1.1.3 Sorties du modèle AMS

Les facteurs simulés par AMS sont nombreux. Seuls les plus utiles dans le cadre de notre étude sont mentionnés :

- Teneur en eau du sol initiale (WHCi) ;
- Besoins totaux de la culture en eau ;
- Indice de satisfaction en eau en fin de cycle (Indx, IndxNor, IndxLatest) ;
- Excès en eau à différents stades phénologiques aux différentes phases phénologiques du cycle de croissance respectivement : phase initiale, phase végétative, floraison, récolte et sur tout le cycle (donnée par la somme des autres valeurs) : WEXi, WEXv, WEXf, WEXr, WEXt ;
- Déficit en eau à différents stades phénologiques et excès en eau total en fin de cycle (WDEFi, WDEFv, WDEFf, WDEFr, WDEFt) ;
- Evapotranspiration à différents stades phénologiques et sa valeur totale en fin de cycle (ETAi, ETAv, ETAf, ETAr, ETAt) ;
- Cr1a à Cr4a (calculés avec les données pluviométriques réelles) et Cr1n à Cr4n (calculés avec les données pluviométriques normales) indiquent les décades auxquelles le rangeland index (RI) croise la ligne de $0.4 * PET$. Ces décades peuvent être associées aux décades de semis. Le rangeland index (RI) correspond à l'indice de satisfaction en eau développé par la FAO calculée sur une période de 5 décades avec l'évapotranspiration normale prise à son niveau potentiel ($Kc = 1$) et la capacité de teneur en eau du sol égale à 50 mm.

2.1.2 Modèle VAST (Vegetation Analysis in Space and Time)

VAST est un programme simple écrit il y a une dizaine d'années par Felix Lee qui permet d'extraire des informations de données satellitaires de NDVI. La particularité de ce programme est qu'il tourne sous MS-DOS.

2.1.2.1 Données d'entrée

Les données d'entrée de VAST sont les images satellitaires NOAA GAC. Les commandes à rentrer sous MS-DOS sont du type :

```
VAST3 <cc> <yr> [inpath] [outpath] [ext] [st_mon] [ed_mon] [pbase] [ptol]
```

Avec : **cc** : les deux premières lettres du nom des images à analyser ;

Yr : deux chiffres spécifiant l'année (p.ex 86, 93, 04)

Inpath : le chemin pour accéder aux données d'entrée ;

Outpath : le chemin où stocker les résultats ;

Ext : 3 caractères maximum qui définissent l'extension des images à analyser ;

st_mon : premier mois de la saison agricole (la première décade est utilisée) ;

ed_mon : dernier mois de la saison agricole (la dernière décade est utilisée) ;

pbase : NDVI seuil à partir duquel la saison agricole débute ;

ptol : l'accroissement minimal de NDVI requis pour le calcul du début de la saison agricole

<>, les paramètres obligatoires [], les paramètres facultatifs

2.1.2.2 Sorties de VAST

VAST crée les images suivantes :

- PEAK : la décade à laquelle le NDVI atteint son maximum
- SDAT : la décade de début de la saison agricole
- HORZ = PEAK - SDAT
- SVAL : la valeur du NDVI à SDAT
- PVAL : la valeur du NDVI à PEAK
- VERT = PVAL - SVAL
- EVAL :, le NDVI au temps PEAK + 4 (soit environ la fin de saison)
- DROP = PVAL - EVAL
- SLOP : la pente de la droite qui rejoint (SDAT, SVAL) à (PEAK, PVAL)
- CUMM : la somme des valeurs de NDVI de SDAT à PEAK
- SKEW : le rapport entre la somme des 3 valeurs de NDVI suivant PEAK (de PEAK + 1 à PEAK + 3) et la somme des 7 valeurs de PEAK - 3 à PEAK + 3.

2.2 METHODE

2.2.1 Approche globale

L'objectif global de cette étude est de sortir un modèle de prévision de la production nationale d'arachide pour le Sénégal aux dates de la troisième décade du mois de septembre et d'octobre. Notre approche a consisté à rechercher dans un premier temps les meilleurs modèles de prévision de rendement au niveau de certains départements, puis de les agréger au niveau national.

Les départements sélectionnés sont Bakel, Bambey, Diourbel, Fatick, Foundiougne, Gossas, Kaffrine, Kaolack, Kébémér, Kolda, Louga, Mbacké, Mbour, Nioro du rip, Sédhiou, Tambacounda, Thiès, Tivaouane et Vélingara. Ces 19 départements représentent en moyenne (période de 1986 à 2004) plus de 90% de la production nationale d'arachide (figure 4).

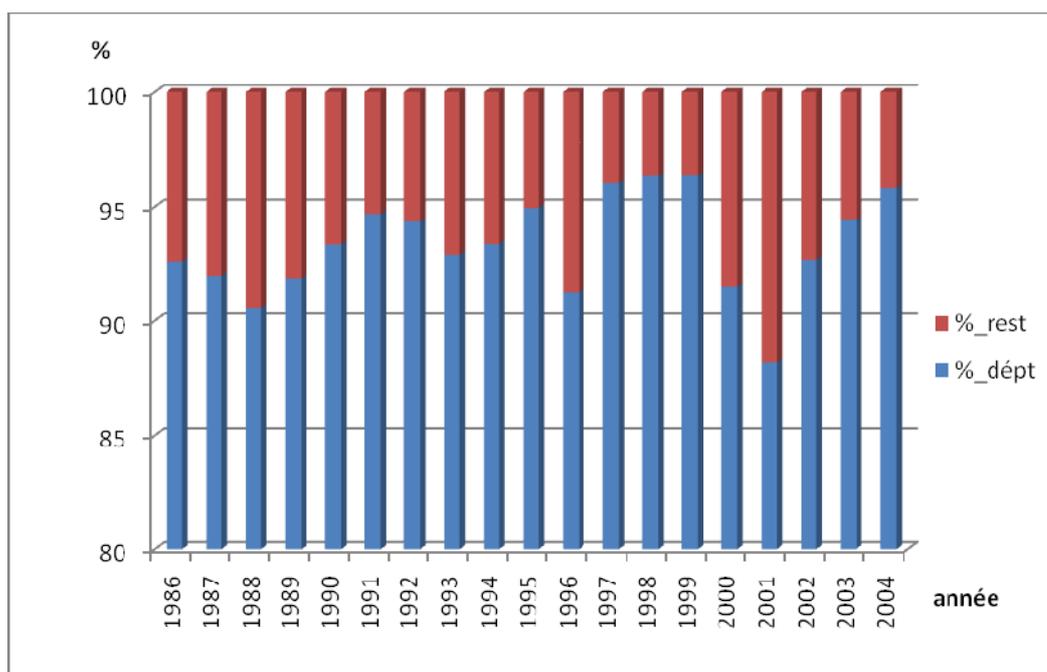


Figure 4 : Productions moyennes nationale et départementale de l'arachide (1986-2004)

Les prévisions de rendement pour la troisième décade du mois de septembre sont réalisées avec les données disponibles à la première décade du même mois. De même, celles de la troisième décade d'octobre sont réalisées avec les données disponibles à la première décade du mois.

Les prévisions à l'échelle départementale sont réalisées en étudiant la corrélation entre les données de rendement historique et un ensemble de facteurs explicatifs. Il y a 3 types de facteurs :

- Facteurs agrométéorologiques (sorties du modèle AMS) ;
- NDVI extraits d'images NOAA GAC et sorties de VAST ;
- Facteurs météorologiques (données pluviométriques).

Les données NDVI et pluviométriques considérées concernent le cumul à chaque stade phénologique du cycle de croissance de l'arachide.

L'agrégation au niveau national a consisté à inclure seulement les départements pour lesquels le modèle trouvé a un R^2_{cv} (R^2 après validation croisée) supérieur à 0.2 (équation 4).

Le R^2 et le RMSE sont calculés par comparaison avec les données de rendement de la DAPS.

$$Y_{nat} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_{dep,i} * S_i \right)}{S} * \frac{1}{a_n} \quad (4)$$

Avec, Y_{nat} , le rendement prédit au niveau national (kg/ha)

$Y_{dep,i}$, le rendement prédit pour le département i (kg/ha)

S_i , la surface pour le département i pour une culture donnée

S , la surface nationale prévue pour une culture donnée

n , le nombre de départements du bassin arachidier agrégés au niveau national

a_n , la part de la production nationale produite dans les n départements (moyenne de 1986 à 2004).

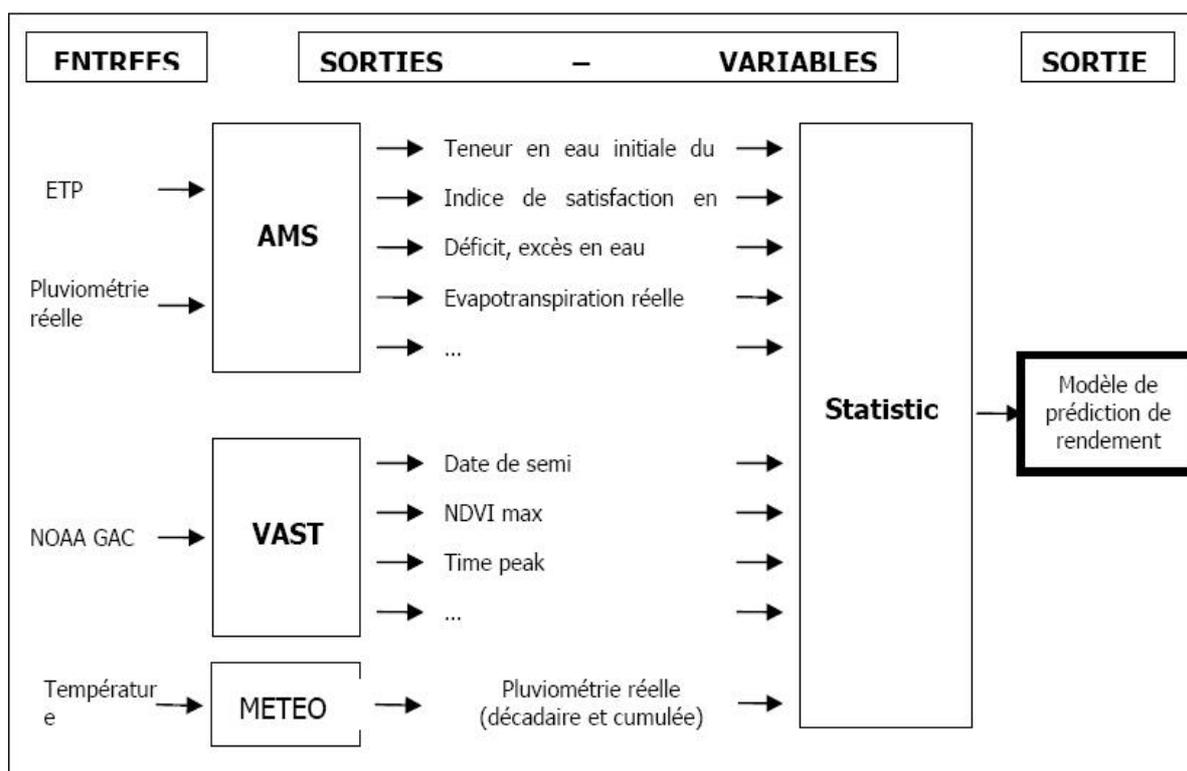


Figure 5 : Approche globale méthodologique

2.2.2 Simulations dans AMS

2.2.1.1 Données d'ETP

Nous travaillons avec les données décadaires d'ETP normale pour les 19 stations considérées.

2.2.1.2 Pluviométrie réelle

Nous travaillons avec les données pluviométriques décadaires de 1986 à 2004 pour les 19 départements. Pour la plupart de ces stations, il manque des données pour certaines années. Pour ces années en question le modèle AMS n'a pas fait de sorties. Nous supposons que les données pluviométriques pour chaque station dans un département donné sont représentatives de la pluviométrie à l'échelle dudit département.

2.2.1.3 Paramètres AMS

Pour réaliser une simulation avec AMS, les paramètres suivants doivent être estimés :

a) Début de la saison agricole

Pour ces prévisions, le début de la saison agricole est calculé par AMS sur base des données pluviométriques réelles. Selon les informations fournies par la DAPS (DAPS, communication orale, 2007), une décade P0 est considérée comme étant le début de la saison agricole si :

- Elle se situe entre la seconde décade de mai et la première décade de septembre.
- La pluviométrie mesurée en P0 est supérieure à 20 mm
- La pluviométrie cumulée mesurée durant les deux décades suivant P0 n'est pas nulle.

b) Paramètres culturaux

Dans le cadre du projet GMFS, les paramètres culturaux et édaphiques sont choisis en concertation avec les experts sénégalais.

- La longueur du cycle de croissance des cultures dépend de la variété cultivée. Dans la plupart des départements, la variété d'arachide cultivée a un cycle de croissance compris entre 85 et 90 jours. Par contre dans les départements de Sédhiou et de Kolda la variété cultivée dure 110 jours. Nous supposons donc que la longueur du cycle est de 9 décades pour tous les départements concernés, à l'exception de Sédhiou et de Kolda où elle est de 11 décades.

- La capacité de rétention en eau du sol (Water Holding Capacity WHC) varie en fonction de l'endroit. Dans le nord (Kebemer et Louga), WHC est égale à 70 mm ; dans le centre elle est égale à 90 mm et dans le sud (Tambacounda, Sédhiou, Vélingara) sa valeur est de 110 mm. Le pourcentage d'eau qui sera effectif pour la plante est fixé à 100% dans le cadre de notre étude.

- L'évolution du coefficient cultural (Kc) est estimée en suivant la procédure FAO (cf. figure 2). Pour les décades précédant le début de la saison agricole, Kc égale 0.1. Les différents coefficients culturaux de l'arachide sont repris dans le tableau 1 ci-après.

Tableau 1 : Coefficients culturaux en fonction du stade phénologique et durée des stades phénologiques de l'arachide

	Initiation	Crop development	Mid season	Late
Kc	0.4	0.4	1.15	0.6
Cycle de 90 j	17 j	24 j	31 j	17 j
Cycle de 110 j	21 j	31 j	38 j	21 j

(Source : *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper, 56*)

La culture d'arachide se fait généralement sans irrigation. La valeur pour l'apport d'eau par irrigation est donc de 0.

Le tableau 2 ci-après donne un exemple de fichier d'entrée d'un calcul de bilan hydrique dans AMS.

Tableau 2 : Exemple de fichier d'entrée d'un calcul de bilan hydrique dans AMS pour la culture d'arachide (Sénégal, année 2001)

Station Name	Planting Dekad	Cycle Length (dekads)	Water Holding Capacity (mm)	Percentage Effective Rainfall (0-100)	Pre-season KCR	Irrigation Application	Irrigation Bund Height (mm)
BAKEL	17	9	90	100	0.1	0	0
BAMBEY	19	9	90	100	0.1	0	0
DIORBEL	19	9	90	100	0.1	0	0
FATICK	18	9	90	100	0.1	0	0
FOUNDIOUGNE	16	9	90	100	0.1	0	0
GOSSAS	19	9	90	100	0.1	0	0
KAFFRINE	17	9	90	100	0.1	0	0
KAOLACK	17	9	90	100	0.1	0	0
KEBEMER	21	9	70	100	0.1	0	0
KOLDA	16	11	110	100	0.1	0	0
LOUGA	20	9	70	100	0.1	0	0
M BACKE	19	9	90	100	0.1	0	0
M BOUR	18	9	90	100	0.1	0	0
NIORO DU RIP	16	9	90	100	0.1	0	0
SEDHIOU	16	11	110	100	0.1	0	0
TAMBACOUNDA	16	9	110	100	0.1	0	0
THIES	18	9	90	100	0.1	0	0
TIVAOUANE	20	9	90	100	0.1	0	0
VELINGARA	16	9	110	100	0.1	0	0

2.2.3 Valeurs NDVI et sorties de VAST

Le NDVI moyen décadaire est extrait d'images NOAA GAC à l'aide de WinDisp 5.1. Ce programme développé par la FAO permet de calculer des statistiques sur des superficies définies par un shapefile. D'après BALAGHI (2006) le rendement en blé au Maroc est hautement corrélé au NDVI cumulé. Dans notre étude nous utilisons le NDVI cumulé pour les différents stades phénologiques de la culture d'arachide. Ainsi, NDVI_I, NDVI_CD, NDVI_MS et NDVI_L désignent respectivement le NDVI cumulé au stade Initiation, Végétation, Floraison-fructification, et au stade de maturation.

Les sorties de VAST qui ont servi pour l'analyse sont cumm, vert, horz, peak, pval, sdat, slop et sval. L'extraction de ces données est faite à partir des données NDVI décadaires du Sénégal pour la période de 1986 à 2004.

2.2.4 Facteurs météorologiques

Les données météorologiques sont constituées des données pluviométriques décadaires de 1986 à 2004, une station par département, en supposant que la station sélectionnée est représentative de l'ensemble du département. Les données pluviométriques utilisées pour les analyses sont le cumul à chaque stade phénologique de la culture.

2.2.5 Régressions dans Statistica

Le set de calibration comprend :

- Les sorties de AMS ;
- Le cumul du NDVI à chaque stade phénologique pour la période de 1986 à 2004 ;
- Le cumul des précipitations à chaque stade phénologique pour la période considérée ;
- Les rendements de la culture d'arachide ;
- Les années : elles sont considérées comme variables afin de prendre en compte la tendance.

Compte tenu des périodes considérées pour la prévision du rendement (3^e décade de septembre et 3^e décade d'octobre), les différents cumuls effectués pour le NDVI et la pluviométrie sont faits en

tenant compte des données disponibles respectivement à la 3^e décennie d'août et à la 3^e décennie de septembre.

Le modèle est élaboré par régression linéaire multiple ascendante 'pas à pas'. La régression pas à pas se compose des étapes suivantes :

1. Choix des variables explicatives : les variables explicatives sont extraites de l'ensemble des variables indépendantes par régression multiple (pas à pas ascendante).
2. Choix des variables pertinentes : parmi ces variables explicatives, les variables qui donnent le meilleur modèle sont sélectionnées. Ce choix est guidé par les critères suivants :
 - coefficient de corrélation élevé (> 0.5),
 - un nombre de variables choisies minimum (entre 2 et 4),
 - des variables non corrélées entre elles,
 - des variables ayant un sens d'un point de vue agronomique.
3. Choix du meilleur modèle : par validation croisée, nous testons la capacité du modèle à prédire le rendement (R^2 calculé entre les valeurs prédites et les valeurs observées). La valeur prédite est la valeur obtenue par le modèle pour une observation contenue dans l'échantillon de validation.

La validation croisée permet de tester la capacité d'un modèle à prévoir le rendement. La validation croisée est surtout utile lorsque le nombre d'observations est trop faible (19 dans le cadre de notre étude) pour pouvoir séparer les observations en un échantillon de calibration et un échantillon de validation.

Le principe consiste à diviser aléatoirement l'ensemble des données d'observations en k partitions P_1, P_2, \dots, P_k de m observations chacune. La validation croisée est alors appelée "k fold cross validation". Ces k partitions serviront à tour de rôle d'échantillon de validation. La calibration s'effectue avec $k-1$ partitions, la $k^{\text{ième}}$ partition servant à valider le modèle ainsi trouvé. Ce processus est ensuite répété $k-1$ fois avec les autres partitions. Finalement, le calcul du coefficient de corrélation entre les observations et les valeurs prédites (R^2_{cv}) nous permet de quantifier la précision du modèle en matière de prévision. Dans ce travail, nous avons pris $k = 10$ à cause du faible nombre d'observations. La validation s'appelle alors "leave-one-out cross validation" (loo cross validation).

En moyenne, pour chaque département 3 modèles sont sélectionnés et comparés par validation croisée. Le modèle présentant le R^2_{cv} le plus élevé est choisi. Seuls les modèles pour lesquels R^2_{cv} est supérieur à 0.2 sont pris en considération.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 PREVISIONS DES RENDEMENTS AU NIVEAU DEPARTEMENTAL

3.1.1 Prévision à la troisième décennie de septembre

Sur les 19 départements utilisés pour l'analyse, 12 présentent un R^2_{cv} supérieur à 0.2.

Le tableau 3 reprend ces différents départements.

Tableau 3 : Prévision des rendements au niveau départemental à la 3^e décennie de septembre

	R²_{cv}	Variables prédictives
Bakel	0.55	ETA _v , ETA _f , NDVI _L
Bambey	0.85	Peak, p _{val} , année
Fatick	0.37	NDVI _{MS} , vert, slop
Gossas	0.32	WDEF _f , Cr1 _a , p _{val}
Kaffrine	0.74	Indxlatest, WEX _f , pluvio _{CD} , vert
Kébémér	0.53	Indxnormal, pluvio _{CD} , p _{val}
Kolda	0.31	Cr1 _a , pluvio _{CD} , pluvio _{MS} , horz
Mbacké	0.45	Cumm, année
Tambacounda	0.51	P _{val} , sdat
Thiès	0.56	Indxharvest, WEX _f , WEX _r
Tivaouane	0.33	ETA _v , pluvio _I , slop
Vélingara	0.41	WEX _v , pluvio _I , pluvio _{CD} , pluvio _L

Avec Peak : décade à laquelle le NDVI atteint son maximum,

Pval : valeur du NDVI à Peak,

Vert : différence entre les valeurs du NDVI à Peak et à la décade de début de saison agricole,

Horz : nombre de décades entre le Peak et la décade de début de saison agricole,

Slop : pente de la droite qui rejoint (Sdat, Sval) à (Peak, Pval),

Cumm : somme des valeurs du NDVI de la décade de début de saison agricole à Peak,

Sval : la valeur du NDVI à SDAT,

Indxnormal : indice FAO de satisfaction en eau attendue en fin de cycle et calculé à partir des données pluviométriques et d'ETP normales,

WEXv, WEXf, WEXr, WEXt : excès en eau respectivement aux phases de végétation, de floraison, de maturation ; et la valeur totale sur le cycle de croissance,

Pluvio_I, Pluvio_CD, Pluvio_MS : cumul pluviométrique respectivement aux phases d'initiation, de végétation et de floraison-fructification,

NDVI_MS, NDVI_L : cumul du NDVI décadaire moyen respectivement aux phases de floraison-fructification et de maturation,

ETA_v : évapotranspiration réelle au stade de végétation,

WDEF_t : déficit en eau totale sur le cycle de croissance,

Cr1a : calculé avec les données pluviométriques réelles ; renvoie à la décade de semis.

Les variables prédictives varient selon les départements. Le rendement au niveau du département de Vélingara est fortement corrélé au cumul pluviométrique aux phases d'initiation, de végétation et de maturation. Le cycle de croissance commençant à la 16^e décade en moyenne dans ce département (cf. annexe 2), l'on peut donc tenir compte du cumul pluviométrique au stade de maturation de la plante. Par contre, pour le département de Tambacounda, le rendement est corrélé aux sorties de VAST. Il dépend de la décade de début de saison agricole et de la valeur du NDVI à la décade où elle est à son maximum.

A partir des départements sélectionnés nous avons procédé à la recherche d'un modèle combinant ces départements et qui ferait une bonne estimation au niveau national. L'approche

utilisée diffère de celle adoptée dans les précédentes prévisions de rendements au Sénégal dans le cadre du projet GMFS (TYCHON et ROSILLON, 2006).

Notre approche a consisté à rechercher d'abord par régression multiple les départements qui ayant un modèle de prévision de rendement correct, sont plus explicatifs de la production au niveau national. Nous avons estimé dans un premier temps les productions sur base des surfaces emblavées réelles (fournies par la DAPS) et des rendements estimés pour chacun des départements ayant donné un modèle de prévision correct. Pour le set de calibration de la régression multiple, nous avons ainsi utilisé les productions nationales observées et les productions estimées départementales sur la période 1986-2004. Cette approche pour tenir compte du facteur surface emblavée au niveau de chaque département (cf. annexe 3). Le meilleur modèle qui sera retenu est celui présentant un bon R^2_{cv} et un bon RMSE. Le tableau 4 donne les différents modèles obtenus après cette analyse.

Par la suite, les départements qui expliquent le mieux la production nationale ainsi obtenus sont utilisés dans l'équation (4) pour l'estimation du rendement au niveau national.

Tableau 4 : Modèles de prévision à l'échelle départementale

	Départements	% / production nationale	R^2_{cv}	RMSE_{cv} (kg/ha)
Modèle 1	Mbacké, Fatick, Tivaouane, Kolda, Tambacounda, Gossas, Bambey	27	0.40	48
Modèle 2	Mbacké, Fatick, Tivaouane, Kolda, Tambacounda, Gossas, Bambey, Mbour, Kébémér	33	0.53	44

Le modèle 2 est nettement meilleur au premier : $R^2 = 0.53$ et un RMSE = 44 kg/ha. Il inclut un nombre plus élevé de départements (9 au total), même si la proportion représentée en terme de production à l'échelle nationale est moins grande (33%). Les différentes équations de prévisions pour chaque département sont reprises dans l'annexe 4.

La validation du modèle de prévision des rendements à l'échelle nationale pour la troisième décennie de septembre est reprise dans la figure 6 ci-après.

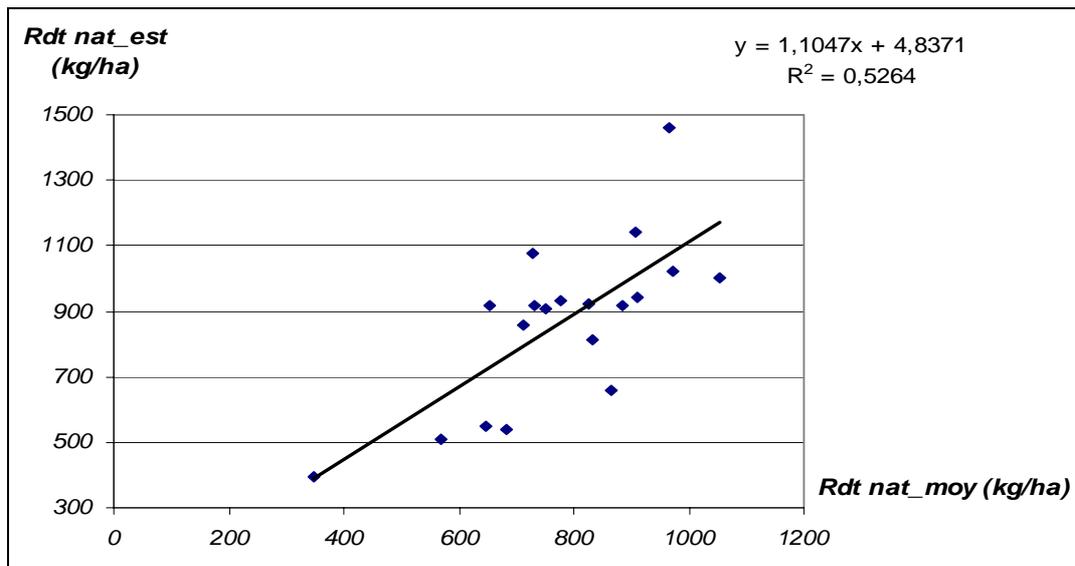


Figure 6 : Validation du modèle de prévision des rendements

La différence observée entre les rendements moyens observé et estimé (tableau 5) montre que pour un département tel Tambacounda, elle est plutôt faible (0,07%). Pour ce département le modèle de prévision de rendement trouvé permet de bonnes estimations. On voit bien que dans l'ensemble ces différences restent relativement faibles durant la période considérée.

Tableau 5 : Rendements moyens observé et estimé (1986-2004) à la 3^e décennie de septembre

	R²	Rendement observé	Rendement prévu	Différence (%)
Mbacké	0,45	558,91	560,05	0,2
Fatick	0,37	691,73	736,21	6
Tivaouane	0,33	547,38	585,62	6,5
Kolda	0,31	1215,14	1235,18	1,6
Tambacounda	0,51	1085,48	1086,32	0,07
Gossas	0,32	644,10	670,11	3,9
Bambey	0,85	596,78	592,72	-0,68
Mbour	0,33	499,38	604,27	17
Kébémér	0,53	480,64	611,97	21

3.1.2 Préviation à la troisième décade d'octobre

Les analyses effectuées pour la troisième décade ont montré que seuls les départements de Kolda, Sédhiou et Louga ne fournissent pas de bons modèles de prévision de rendement. Le tableau 6 ci-après reprend les différentes variables explicatives du rendement pour les autres départements. Dans ce tableau on constate que les variables prédictives du rendement pour les départements de Bambey et de Tambacounda restent inchangées.

Suivant la procédure adoptée pour l'estimation du rendement à la troisième décade de septembre à l'échelle nationale, les départements sélectionnés pour l'estimation du rendement à l'échelle nationale sont : Fatick, Mbacké, Foudiougne, Mbour, Nioro du rip, Tambacounda et Tivaoune. Les différentes équations de prévisions sont reprises dans l'annexe 4.

Le nombre de départements inclus dans le modèle est moins grand que celui des départements inclus pour l'estimation à la fin septembre (7 au lieu de 9). Ces départements représentent pratiquement 37% de la production nationale.

Tableau 6: Variables explicatives du rendement à la 3^e décade d'octobre

	R²cv	Variables prédictives
Bakel	0.48	WEXt, WDEFv, ndvi_CD, pluvio_CD
Bambey	0.85	Peak, pval, année
Diourbel	0.68	NDVI_MS, Cr1a, pluvio_L
Fatick	0.43	WEXi, NDVI_L, peak, slop
Foundiougne	0.24	ETAr, NDVI_CD
Gossas	0.42	WEXr, Cr1a, NDVI_CD, peak
Kaffrine	0.76	Pluvio_CD, vert
Kaolack	0.2	Pluvio_L, vert
Kébémér	0.52	Pluvio_CD, vert
Mbacké	0.45	Cumm, année
Mbour	0.34	Indxnormal, pluvio_L
Nioro du rip	0.32	WEXv, WEXt, pluvio_MS, sval
Tambacounda	0.51	pval, sdat
Thiès	0.49	WEXf, horz
Tivaouane	0.65	Pluvio_CD, cumm
Vélingara	0.37	WEXv, pluvio_I, pluvio_CD, pluvio_L

La figure 7 donne la relation entre le rendement estimé et le rendement moyen sur la période 1986-2004 à la troisième décennie d'octobre.

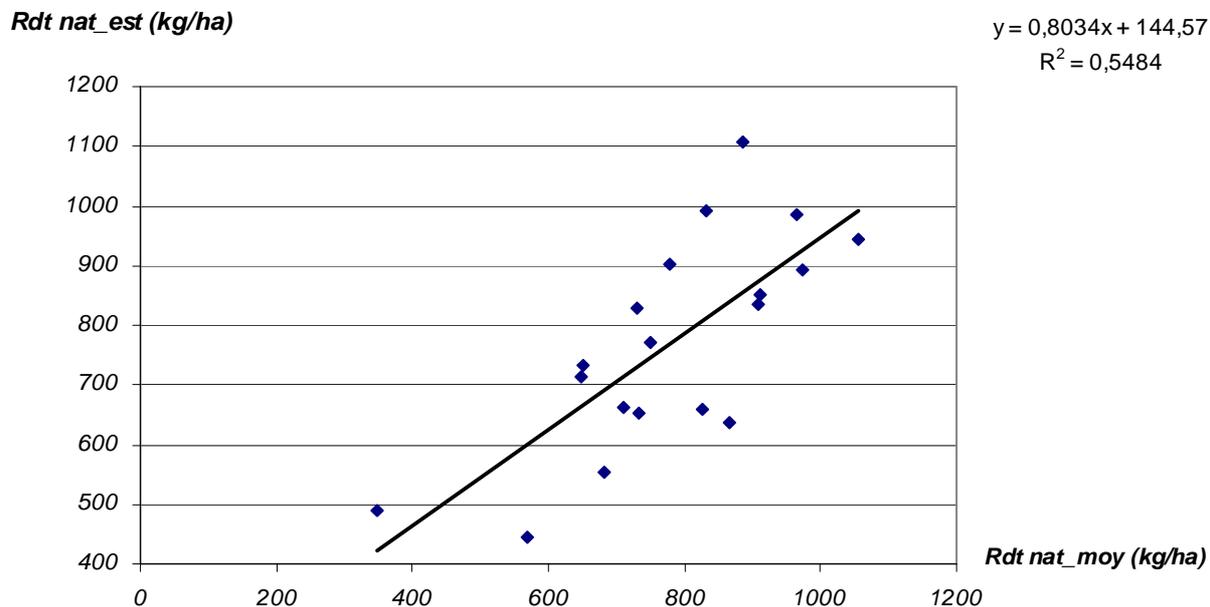


Figure 7 : Relation entre le rendement moyen national et le rendement observé à la troisième décennie d'octobre

Le modèle de prévision de rendement à l'échelle nationale pour la troisième décennie d'octobre fournit une bonne relation avec les rendements moyens observés ($R^2 = 0,55$). L'erreur de prédiction est également assez faible ($RMSE = 28$ kg/ha). Le modèle de prévision trouvé explique pour plus de la moitié le rendement moyen national à cette période.

3.2 PREVISION DE LA PRODUCTION NATIONALE D'ARACHIDE

Sur base des rendements estimés nous pouvons calculer la production nationale correspondante.

3.2.1 Prévission de la production nationale à la troisième décade de septembre

La figure 8 montre l'évolution de la production nationale observée et la production nationale estimée à partir de l'équation 4.

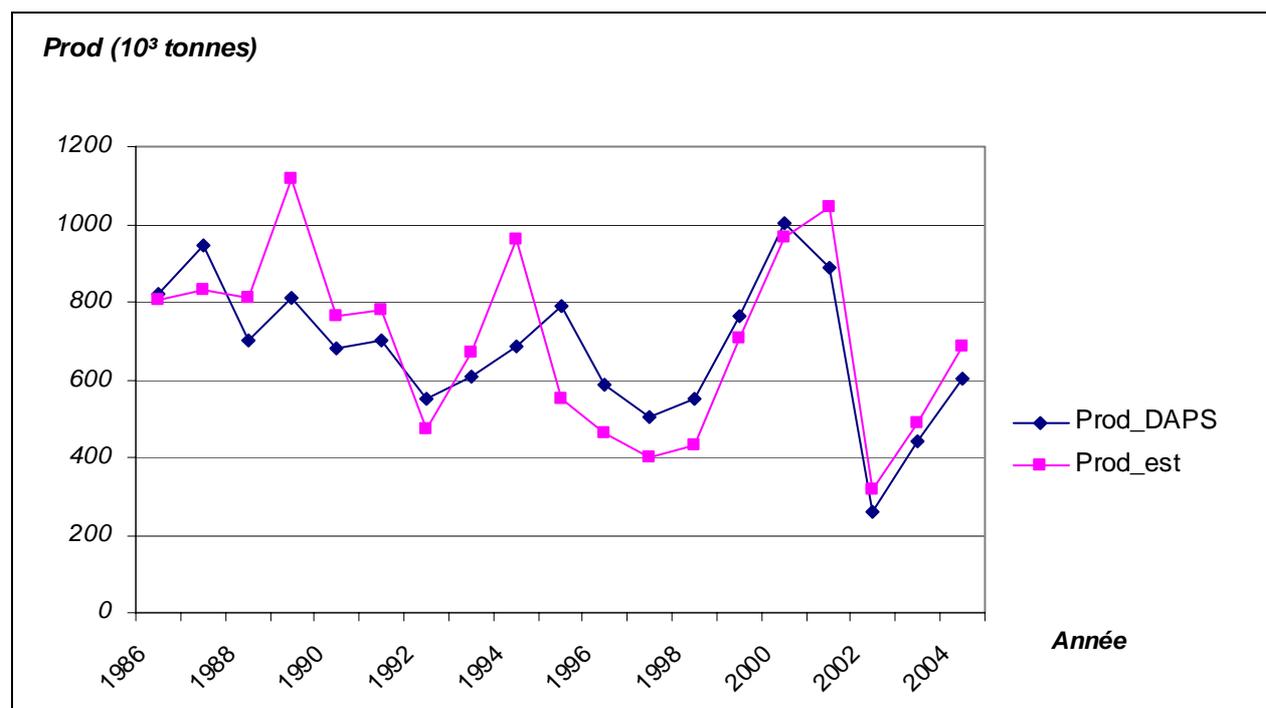


Figure 8 : Comparaison entre la production nationale estimée et la production nationale observée pour la période de 1986-2004 à la 3^e décade de septembre

Nous constatons que les deux courbes présentent en général la même allure. Mais on peut noter de fortes surestimations de la production nationale en 1989 et 1994. Le calcul du coefficient de corrélation entre ces deux séries donne une valeur de 0.64.

3.2.2 Prédiction de la production nationale à la troisième décade d'octobre

La figure 9 met en évidence l'évolution de la production nationale d'arachide et la production estimée à la fin du mois d'octobre.

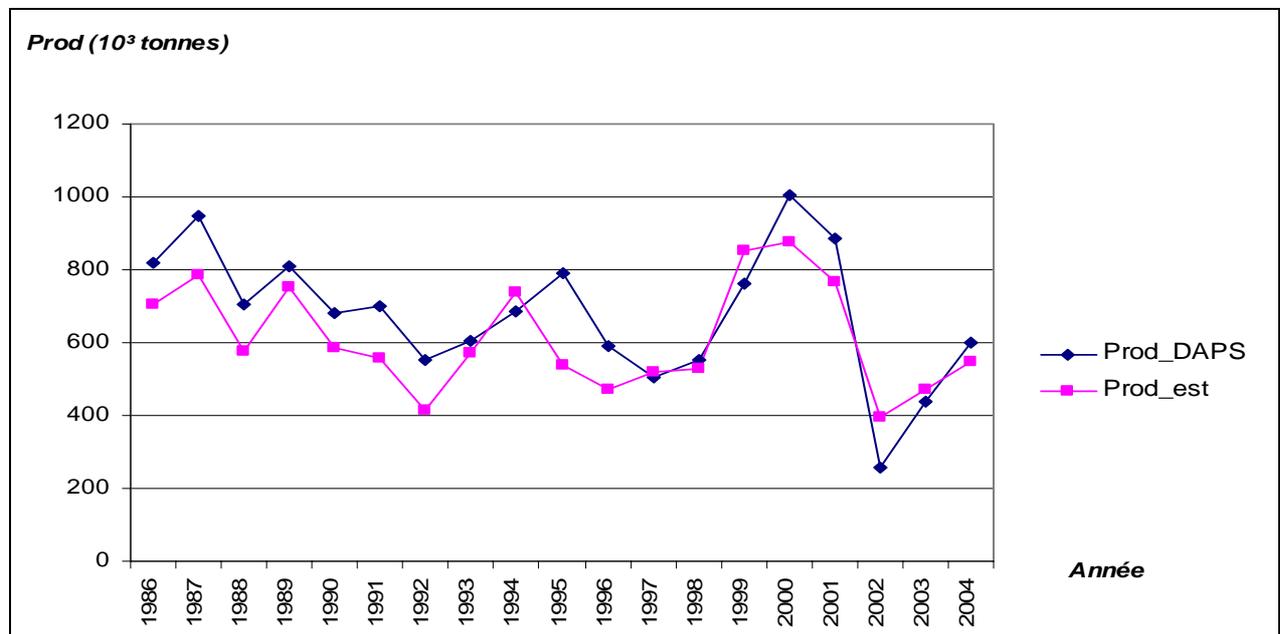


Figure 9: Comparaison entre la production nationale estimée et la production nationale observée pour la période de 1986-2004 à la troisième décade d'octobre

Le modèle suit dans l'ensemble l'allure de la courbe de la production nationale. Le coefficient de corrélation calculé est égal à 0.71. Les différences entre la production nationale observée et celle estimée varient entre - 4% (en 1998) et 54% (en 2002).

Une comparaison avec les données statistiques de la FAO (www4) sur la même période donne également une bonne valeur du R² dans le même ordre de grandeur que celui des statistiques nationales sénégalaises : R² = 0.78 (cf. annexe 5).

Les prévisions de rendement d'arachide au niveau départemental sont nettement meilleures à la troisième décennie du mois d'octobre qu'à la troisième décennie de septembre. Il en va de même de l'estimation de la production à l'échelle nationale.

Pour certains départements tels Tambacounda, Vélingara, Bambey et M'Backé, les modèles de prévision de rendement restent inchangés sur les deux périodes. Pour les premiers (Tambacounda et Vélingara) le cycle de culture s'achève en moyenne à la première décennie de septembre. Pour une estimation du rendement à la troisième décennie d'octobre, il n'est plus nécessaire d'utiliser les données après cette date pour le set de calibration.

Tandis que pour les départements de Bambey et de M'Backé, bien qu'utilisant des données complémentaires pour la prévision du rendement à la fin du mois d'octobre, les prédicteurs restent inchangés. Les prédicteurs pour ces deux départements sont des informations tirées du NDVI décennaire moyen. Le rendement dans ces zones dépend plus du NDVI.

Pour une prévision à la fin du mois de septembre, toutes les données ne sont pas encore disponibles pour une meilleure estimation. Les cycles de culture n'étant pas les mêmes sur l'ensemble du territoire, il se trouve que pour la plupart des départements en moyenne le cycle de croissance n'est qu'à la moitié. De plus, sur la période de 1986 à 2004, les départements sélectionnés pour le modèle de prévision à l'échelle nationale, excepté Tambacounda, ne sont pas de très grands producteurs. Le modèle obtenu nous renseigne toutefois sur la tendance de la production nationale (*cf. fig 8*).

Pour la troisième décennie d'octobre par contre on note une amélioration du modèle de prévision. A cette période, les départements qui interviennent dans le modèle de prévision à l'échelle nationale représentent 54% de la production moyenne nationale. Les cycles de culture sont au dernier stade phénologique pour la plupart des départements. Une estimation du rendement à cette période guide dans les prises de décisions en matière de sécurité alimentaire.

CONCLUSION

La réduction de la vulnérabilité des populations face à un risque donné constitue un maillon essentiel pour une bonne gestion de ce risque. Au Sénégal, face aux différents aléas climatiques que connaît le pays depuis des décennies, notamment la sécheresse, la vulnérabilité des populations rurales s'est accru d'autant plus que leurs produits agricoles sont largement tributaires des conditions climatiques. L'arachide qui constitue la source privilégiée de revenu en tant que principale culture de rente n'est pas exclue.

Le modèle de prévision élaboré dans le cadre de cette étude à partir des informations tirées des données satellitaires et de données agrométéorologiques permet une estimation relativement bonne des rendements de la culture d'arachide à l'échelle nationale ($R^2 = 0.55$ et $RMSE = 28$ kg/ha) à la troisième décennie du mois d'octobre. Ce modèle de prévision à l'échelle nationale se base sur la prédiction des rendements au niveau de quelques départements du pays. Cette étude a montré par ailleurs que l'estimation faite à la troisième décennie de septembre ($R^2 = 0.53$ et $RMSE = 44$ kg/ha) était moins bonne que celle effectuée au mois d'octobre, en terme d'erreur de prédiction. Plus l'on dispose de données, meilleure est l'estimation que l'on peut faire.

Le choix des variables explicatives dans le cadre de cette étude s'est faite par régression multiple. Mais l'adoption d'autres techniques d'analyses telles l'analyse en composantes principales ou l'analyse en moindre carrés partiels, constitueraient des voies à explorer pour des études futures.

BIBLIOGRAPHIE

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper, 56.
- Balaghi, R., 2006. Wheat grain yield forecasting models for food security in Morocco. PhD thesis, University of Liège, 104p.
- Barraud, M., Maury, F., 2004. SENEGAL : l'affaire Sonacos - 13 juin 2004 - Ecofinance, Mensuel, France.
- Bydekerke, L., Avril 2006. Service Operations Report Senegal 2005. Earth Watch GMES Services Element (GSE) ESA ESRIN. 45p. (<http://www.gmfs.info>. Consulté le 25/07/07)
- Diagne, B., Séne, A., Sagna, P., 2003. Evolution climatique et tendances au Sénégal. Atelier du Comité National Carbone (Projet SOSCOM) 11-15 Mars 2003. Dakar. (<http://www.cse.sn/carbone/index.html>. Consulté le 1/08/07)
- FAO, CSE, Avril 2003. L'évaluation de la dégradation des terres au Sénégal. Projet FAO Land Degradation Assessment. Rapport préliminaire. 59p.
- Gaye, A.T., NDione, J.A., Citeau, J., 2000. Les modifications du climat au Sénégal. Atelier International sur la Séquestration du Carbone dans les sols. Dakar, 25 au 27 septembre 2000. CSE/Eros Data Center. (http://lada.virtualcentre.org/eims/download.asp?pub_id=92363 Consulté le 1/08/07)
- Heimo, C.R., 2004. Introduction au projet de gestion de l'information spatiale pour le suivi de la sécurité alimentaire. GMFS Policy Foundation. Report Submitted to the European Space Agency on May 2004 on behalf of the GMFS Consortium. (<http://private.mcnet.ch/ecology/id37.htm> Consulté le 25/07/07)

- Initiative Prospective Agricole et Rurale, Avril 2007. Le Sénégal à l'horizon 2030. D'une société paysanne à une société urbaine ? Document d'orientation de l'IPAR 2007-2009. (http://www.prospectiveagricole.org/doc/doc_orien.pdf. Consulté le 15/08/07)
- Ministère de la coopération française, 1993. Mémento de l'agronome. Collection « Techniques rurales en Afrique ». Quatrième édition. France. pp 867-880.
- Ndione, J.A., Février 2002. Bilan climatique de l'observatoire ROSELT du FERLO (Sénégal). Rapport de consultation. Programme ROSELT/OSS – Centre de Suivi Ecologique. Sénégal. 38p. (http://213.154.85.77/roselt/documents%20sites%20roselt/Rapports%20An1/Rp_climat%20ROSELT-Senegal.fev2002.pdf. Consulté le 1/8/07)
- Sagna, P., 2000, Le climat. In Atlas du Sénégal, pp 16-19. Paris Ed Jeune Afrique, 1980, 5^e Edition, 84p.
- SCHILLING, R., 1997. Arachide. Données agronomiques de base sur la culture arachidière. Oléagineux, Corps Gras, Lipides. Volume 8, Numéro 3, 230-6, Mai - Juin 2001, Dossier : Soja, arachide, coton : aspects des conditions d'évolution des filières. (<http://museum.agropolis.fr/pages/savoirs/arachide/arachide.htm> Consulté le 8/8/07)
- Sultan, B., Baron, C., Dingkuhn, M., Sarr, B., Janicot, S., 2005. La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnière et intra-saisonnière. II : applications à la sensibilité des rendements agricoles au Sahel. Article de recherche. Sécheresse 16 (1) : 23-33.
- Tychon, B., Rosillon, D., Décembre 2006. Prévision des rendements (mil, sorgho, maïs et niébé) Sénégal. 2^e décade d'octobre, pp 68-105. In Gilliams, S., Mars 2007. Service Operations report Senegal 2006. Earth Watch GMES Services Element (GSE) ESA ESRIN. 122p. (<http://www.gmfs.info>. Consulté le 25/07/07)
- Wallach, D., Goffinet, B., Tremblay, M., 2001. Parameter estimation in crop models : exploring the possibility of estimating linear combinations of parameters. Agronomie 22. INRA, EDP Sciences. pp 171-178.

Sites Internet consultés :

www1 : <http://www.gmfs.info> (25/07/07)

www2 : <http://www.primature.sn/politiques/polagricole3.html> (30/07/07)

www3 : <http://www.gouv.sn/senegal/index.html> (30/07/07)

www4 : <http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=567&lang=fr>

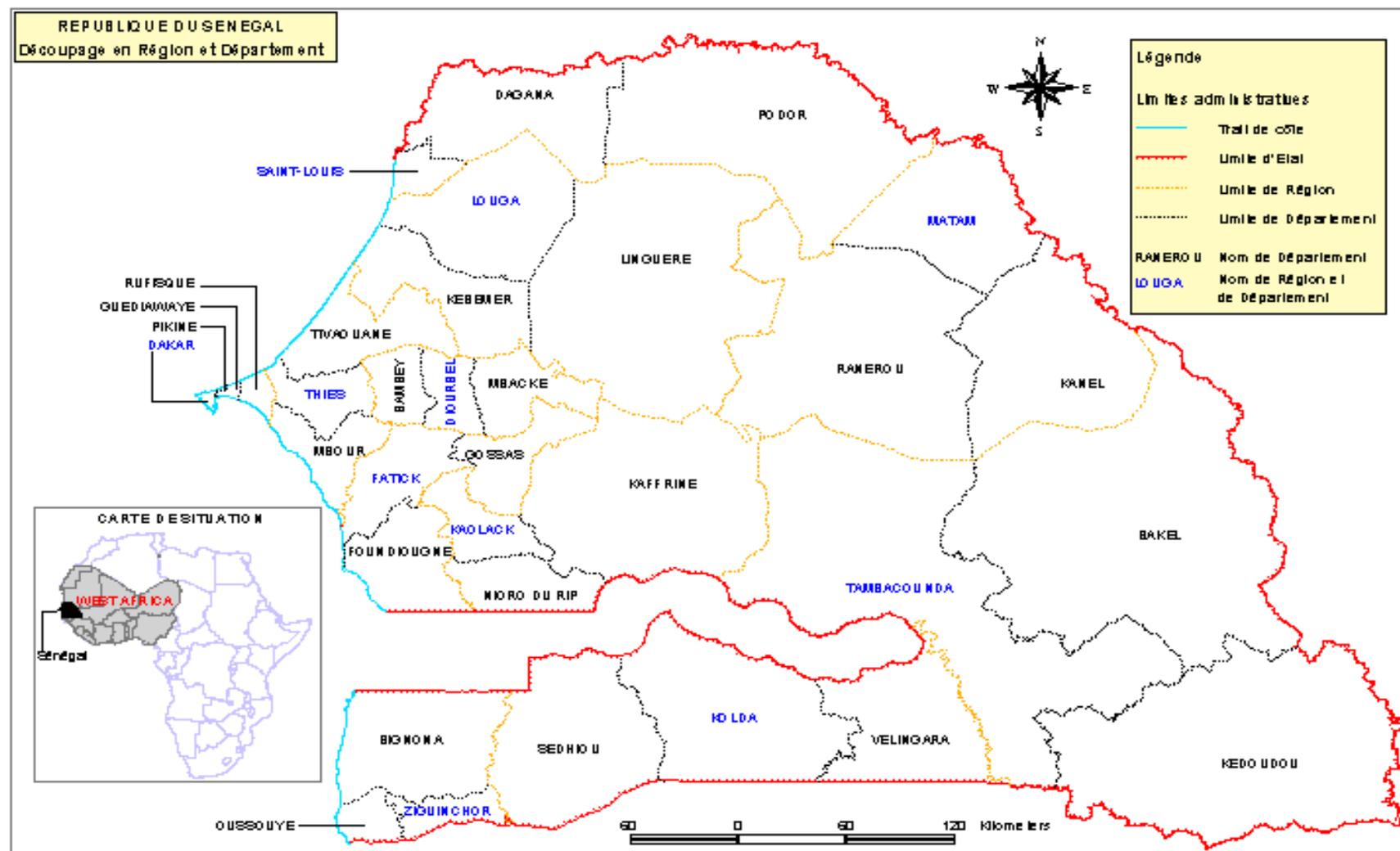
<http://streaming.ictp.trieste.it/preprints/P/95/294.pdf> (8/8/07)

http://mistowa.org/files/corpao1_2006/CRPA032006_2_Situation_alimentaire_en_Afrique_de_l'Ouest_M_Konate_CILSS.pdf (8/8/07)

ANNEXES

- Annexe 1 : Découpage administratif du Sénégal
- Annexe 2 : Décades de semis de l'arachide pour la période de 1986 à 2004
- Annexe 3 : Pourcentages en terme de superficies et de productions moyennes d'arachide par département
- Annexe 4 : Equations de prévision du rendement de l'arachide à l'échelle départementale
- Annexe 5 : Comparaison production nationale observée FAO et estimée (en tonnes)

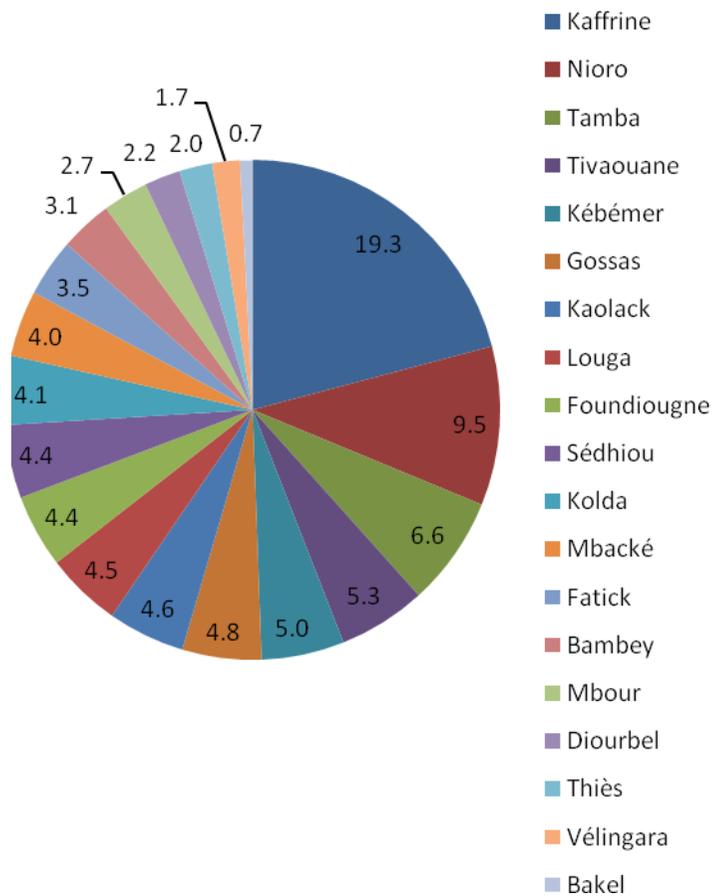
ANNEXE 1 : Découpage administratif du Sénégal



ANNEXE 2 : Décades de semis de l'arachide pour la période de 1986 à 2004

	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Moyenne
Bakel	18	17	17	16	17	18	17	18	17	17	17	17	18	16	17	17	17	18	16	17
Bambey	22	21	22	18	21	22	21	21	22	19	21	22	23	20	20	19	22	21	23	21
Diourbel	22	21	22	18	21	22	22	21	22	20	21	22	22	21	20	19	22	21	23	21
Fatick	21	21	21	17	20	22	21	21	22	19	20	20	23	20	20	18	21	21	19	20
Foundiougne	18	17	19	16	18	19	18	18	19	18	17	17	21	17	18	16	19	20	19	18
Gossas	21	20	21	18	21	23	21	21	21	20	20	21	22	20	19	19	21	22	20	21
Kaffrine	20	18	19	17	20	22	18	20	19	19	19	21	20	19	18	17	21	21	19	19
Kaolack	20	20	20	17	20	21	19	20	19	18	19	19	22	19	18	17	21	21	20	19
Kébemer	22	21	22	18	21	23	22	22	22	21	21	24	22	21	20	21	21	22	22	21
Kolda	16	16	16	16	16	17	16	16	16	17	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Louga	22	20	22	19	20	23		22	22	19	20	23	22	20	20	20		21	21	21
Mbacké	21	21	22	17	21	22	22	21	22	19	21	22	22	20	20	19	21	21	21	21
Mbour	21	20	20	17	20	21	21	20	21	19	20	21	22	19	20	18	22	21	22	20
Nioro du Rip	20	17	19	16	19	20	18	19	19	19	19	17	21	18	18	16	20	21	20	19
Sédhiou	17	16	17	16	17	18	17	16	17	17	16	16	17	16	16	16	16	17	16	17
Tambacounda	17	16	16	16	16	16	16	16	17	16	16	16	17	16	16	16	16	17	16	16
Thiès	20	20	20	17	20	22	20	21	22	19	20	22	22	19	20	18	22	22	23	20
Tivaouane	22	21	22	19	21	22	21	21	23	21	21	23	22	20	20	20	22	22	22	21
Vélingara	17	16	16	16	16	16	16	16	17	17	17	16	17	16	16	16	16	16	16	16

ANNEXE 3 : Pourcentages en terme de superficies et de productions moyennes d'arachide par département



*Figure 1 : Superficie emblavée moyenne par département
(Période 1986-2004)*

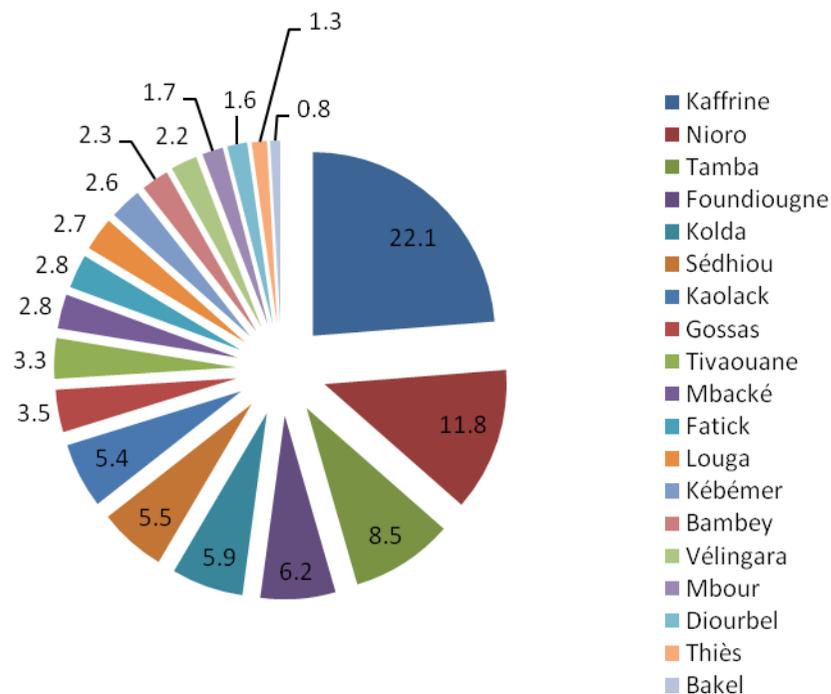


Figure 2 : Production moyenne par département (Période 1986-2004)

ANNEXE 4 : Equations de prévision du rendement de l'arachide à l'échelle départementale

❖ 3^e décade du mois de Septembre

- Gossas :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = 510.17 + 16.59 * \text{WDEff} - 69.09 * \text{Cr1a} + 12.72 * \text{pval}$$

- Bambey :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = 33192 - 52.29 * \text{Peak} + 19.07 * \text{Pval} - 16.74 * \text{Année}$$

- Mbour :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = -1787.61 + 15.97 * \text{Indxnormal} + 11.22 * \text{vert}$$

- Fatick :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = -827.88 + 792.9 * \text{NDVI}_{\text{MS}} - 7.1 * \text{vert} + 42.69 * \text{slop}$$

- Kébémér :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = -2053.76 + 7.4 * \text{Indxnormal} - 0.41 * \text{pluvio}_{\text{CD}} + 18.96 * \text{pval}$$

- Kolda :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = 3962.32 - 106.86 * \text{Cr1a} - 1.76 * \text{Pluvio}_{\text{CD}} + 0.34 * \text{Pluvio}_{\text{MS}} - 65.26 * \text{Horz}$$

- Mbacké :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = 27055 + 50.07 * \text{Cumm} - 13.88 * \text{Année}$$

- Tambacounda :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = 309.97 + 12 * \text{pval} - 64.72 * \text{Sdat}$$

- Tivaouane :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = 8020.4 - 172.64 * \text{ETA}_{\text{v}} + 1.13 * \text{Pluvio}_{\text{I}} + 26.68 * \text{Slop}$$

❖ *3^e décade du mois d'octobre*

- Mbour :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = -917.09 + 13.26 * \text{Indxnormall} + 1.66 * \text{pluvio_L}$$

- Fatick :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = 2027.2 - 0.76 * \text{WEXi} + 942.13 + \text{NDVI_L} - 109.83 * \text{peak} + 36.16 * \text{slop}$$

- Foundiougne :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = 6952.4 - 109.15 * \text{ETAr} + 2455.21 * \text{NDVI_CD}$$

- Mbacké :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = 27055 + 50.07 * \text{Cumm} - 13.88 * \text{Année}$$

- Nioro du rip :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = -2292 + 2.2 * \text{WEXv} + 1.06 * \text{WEXt} - 2.63 * \text{pluvio_MS} + 62.12 * \text{Sval}$$

- Tambacounda :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = 309.97 + 12 * \text{Pval} - 64.72 * \text{Sdat}$$

- Tivaouane :

$$\text{Yield}_{\text{est}} = -538.38 - 2.04 * \text{Pluvio_CD} + 66.96 * \text{Cumm}$$

ANNEXE 5 : Comparaison production nationale observée FAO et estimée (en tonnes)

	Production_FAO	Production estimée / Septembre	Production estimée / Octobre
1986	842 564	804 421,86	703 845,22
1987	963 123	831 881,23	785 025,04
1988	722 898	811 511,38	577 519,80
1989	844 225	1 114 583,12	753 873,22
1990	702 584	761 294,57	587 829,12
1991	724 416	777 932,56	554 957,00
1992	578 498	471 672,51	412 651,63
1993	627 633	672 380,96	569 199,27
1994	678 040	959 649,80	739 655,25
1995	790 617	552 018,44	535 941,47
1996	646 394	460 394,93	473 791,21
1997	544 825	400 326,17	518 663,25
1998	579 067	430 173,28	527 312,16
1999	1 014 250	704 872,63	850 936,60
2000	1 061 540	968 276,91	874 856,50
2001	887 356	1 044 871,82	764 994,23
2002	260 723	318 904,18	396 330,41
2003	440 709	488 748,45	473 011,22
2004	602 62	683 172,87	546 154,95