



HAL
open science

**Utilisation conjointe de la télédétection et de l'enquête
de terrain lors des inventaires d'occupation du sol.
Recherche méthodologique appliquée au Sahel
sud-mauritanien**

Vincent Godard

► **To cite this version:**

Vincent Godard. Utilisation conjointe de la télédétection et de l'enquête de terrain lors des inventaires d'occupation du sol. Recherche méthodologique appliquée au Sahel sud-mauritanien. Géographie. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), 1991. Français. NNT: 1991EHES0066 . tel-01024191

HAL Id: tel-01024191

<https://theses.hal.science/tel-01024191>

Submitted on 18 Jul 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire
des Pays tropicaux
Département du CIRAD
10, rue Pierre Curie
94704 MAISONS ALFORT Cedex
(France)

URBAMA
bibliothèque
CNRS UNIVERSITÉ de TOURS

T-1413/1

R.R.B.

Utilisation conjointe de la télédétection et de l'enquête de terrain lors des inventaires d'occupation du sol.



CNRS-UNIVERSITÉ DE TOURS
M.S.H. "VILLES ET TERRITOIRES"
UMS 1835
BP 60449
33, allée Ferdinand de Lesseps
37204 TOURS Cedex 03

Recherche méthodologique appliquée au Sahel sud-maëritanien.

Vincent GODARD

Thèse de doctorat en géographie
de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales
— E.H.E.S.S. —

Soutenue publiquement le ²⁰ Décembre 1991

- en présence de : — M. BARBUT
— E. BERNUS
— G. DE WISPELAERE
— M. HOTYAT
— G. ROUGERIE





Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire
des Pays tropicaux
Département du CIRAD
10, rue Pierre Curie
94704 MAISONS ALFORT Cedex
(France)

Don P.R. Boshoff
6/6/2000

**Utilisation conjointe
de la télédétection
et de l'enquête de terrain
lors des inventaires
d'occupation du sol.**



**Recherche
méthodologique
appliquée au Sahel
sud-mauritanien.**

P.R.B.

Vincent GODARD

Thèse de doctorat en géographie
de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales
— E.H.E.S.S. —

Soutenue publiquement le ²⁰ Décembre 1991

en présence de : — M. BARBUT
— E. BERNUS
— G. DE WISPELAERE
— M. HOTYAT
— G. ROUGERIE

Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales

**Utilisation conjointe de la télédétection et
de l'enquête de terrain lors des inventaires
d'occupation du sol.**

Recherche méthodologique appliquée au Sahel sud-mauritanien.

Vincent GODARD

BIBLIOTHÈQUE
INTERUNIVERSITAIRE
CUJAS

Thèse de doctorat en géographie
de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales
(EHESS)

Soutenue publiquement le ²⁰ décembre 1991

en présence de :

- M. BARBUT
- E. BERNUS
- G. DE WISPELAERE
- M. HOTYAT
- G. ROUGERIE

LISTE DES ABREVIATIONS

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BDPA	Bureau pour le Développement de la Production Agricole
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
EHESS	Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales
EOSAT	Earth Observation SATellite company
GDTA	Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale
GPS	Global Positioning System
HRV	Haute Résolution dans le Visible
IEMVT	Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux
IGN	Institut Géographique National
IFN	Inventaire Forestier National
OMVS	Office de Mise en Valeur du fleuve Sénégal
OPIT	Opération Pilote Interministérielle de Télédétection
ORSTOM	Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ex Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer)
MSS	MultiSpectral Scanner
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
RIM	République Islamique de Mauritanie
SCEES	Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques
SOSPAT	Système d'Observation Statistique de Prévision Agricole par Télédétection
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
TER-UTI	enquête d'UTILISATION du TERRITOIRE
TM	Thematic Mapper
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator grid

INTRODUCTION

Avec un peu plus d'un million de kilomètres carrés, la République Islamique de Mauritanie (RIM) est un des pays les plus vastes du continent africain, mais aussi un des plus désertiques. Les deux tiers de son territoire sont occupés par le désert du Sahara. Seule, sa frange sud échappe à ce domaine hyper-aride et permet à l'homme des activités telles que l'élevage et, plus aléatoirement, les cultures.

Cette étroite bande de quelques dizaines de kilomètres qui, dans le sud-ouest de la Mauritanie, longe le fleuve Sénégal, est depuis plusieurs années une zone de conflits entre agriculteurs et éleveurs plus ou moins sédentarisés. Il a suffi en avril 1989 d'une divagation de troupeau sur des zones cultivées, pour que les tensions liées aux problèmes fonciers, dans la vallée du fleuve Sénégal, dégénèrent en conflit armé avec les enchaînements dramatiques que l'on sait.

Conscients de l'importance stratégique de la frange sud de leur territoire, les Mauritaniens ont depuis de nombreuses années cherché à en évaluer les potentialités. Cette recherche s'inscrit dans ce processus d'évaluation des ressources du milieu pour lequel l'Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux (IEMVT), département élevage du Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), est intervenu, sur un financement du Fond d'Aide et de Coopération (FAC) du ministère de la coopération française.

Le Ministère du Développement Rural (MDR) mauritanien souhaitait que plusieurs axes de recherche soient abordés. Il s'agissait de tester, dans le cadre d'un suivi intégré de l'environnement par télédétection, les capacités de SPOT1 pour :

- l'estimation et la cartographie des postes d'occupation du sol de deux zones tests du Sahel sud-mauritanien ;
- l'évaluation du disponible fourrager en fin de saison des pluies de ces mêmes zones tests.

A la demande des Mauritaniens, une des zones tests a été positionnée dans un secteur essentiellement pastoral, au nord de la ville de Rosso, région du Trarza (cf. fig. 0.1), tandis que l'autre a été située dans un secteur agro-pastoral, à l'est de Kaédi, région du Gorgol.

Enfin, un dernier axe de recherche devait permettre de déterminer et d'évaluer une méthode de diagnostic rapide des systèmes oasiens dans l'Assaba à l'aide du même type de données satellitaires.

L'optique "Recherche Développement" est une des caractéristiques des activités du CIRAD et tout particulièrement de l'IEMVT. Cette recherche méthodologique s'est naturellement inscrite dans ce courant de réflexion et d'action.

Elle se propose de mettre au point une méthode de collecte et de traitement de l'information qui combine les techniques de sondage et la télédétection. Elle cherche à améliorer la phase de prospection sur le terrain et celle du traitement en laboratoire des observations effectuées pour les inventaires d'occupation du sol en milieu naturel tropical.

La finalité de cette méthode est d'être transférable aux agents qui ont en charge le développement des régions arides et semi-arides. Pour cela notre recherche s'est toujours fixé comme objectif de retenir les **solutions** les plus **simples** même si elles ne sont pas les plus performantes en termes de précision. Ces solutions doivent être **fiables**, même appliquées par des agents non-spécialistes, **efficaces**, pour que le coût de fonctionnement ne soit pas une entrave à leur utilisation et enfin **faciles à réitérer** pour permettre, d'une part les contrôles, d'autre part autoriser un suivi peu coûteux et comparable d'une année sur l'autre.

La télédétection et les sondages sont des outils au service de la recherche et du développement. Ils ne sont ni une panacée ni une fin en soi. Pour qu'ils apportent un élément de réponse à nos problèmes il faut connaître leurs limites. La télédétection a une vision géographique exhaustive de la zone d'enquête mais elle ne va pas dans le détail. Les sondages permettent d'étudier les détails mais n'apportent pas l'exhaustivité indispensable à la spatialisation de l'information, donc de sa connaissance. Nous allons nous efforcer de démontrer que l'acquisition de cette connaissance du terrain passe par la complémentarité de ces deux outils.

La Mauritanie offre un terrain d'étude relativement vierge. Il suffit, pour s'en convaincre, de consulter les fichiers des centres de documentation des organismes dont l'activité est tournée vers les pays tropicaux. Comparé à ceux du Sénégal, le fichier Mauritanie est en général désespérément "maigre". Il est vrai que la présence française y fut plus courte. Elle dure à peine 60 ans¹, de 1907, date de son rattachement à l'Afrique Occidentale Française, à 1960 date de son indépendance. Encore faut-il attendre 1934 pour que le Nord de la Mauritanie soit "pacifié"², alors que dès le milieu du XIXe siècle³, Faïdherbe pacifie le futur Sénégal et le livre à des cohortes de voyageurs et de chercheurs qui vont constituer un fond documentaire dont la Mauritanie ne peut se prévaloir. Actuellement ce manque d'intérêt semble se poursuivre. La fréquence des épisodes arides s'est accentuée sur le Sahel ces 20 dernières années, suscitant de très nombreuses études sur la végétation de l'ensemble des pays sahéliens. Pourtant, M. Carrière⁴ n'en recense pratiquement aucune sur la Mauritanie, elle aussi très touchée.

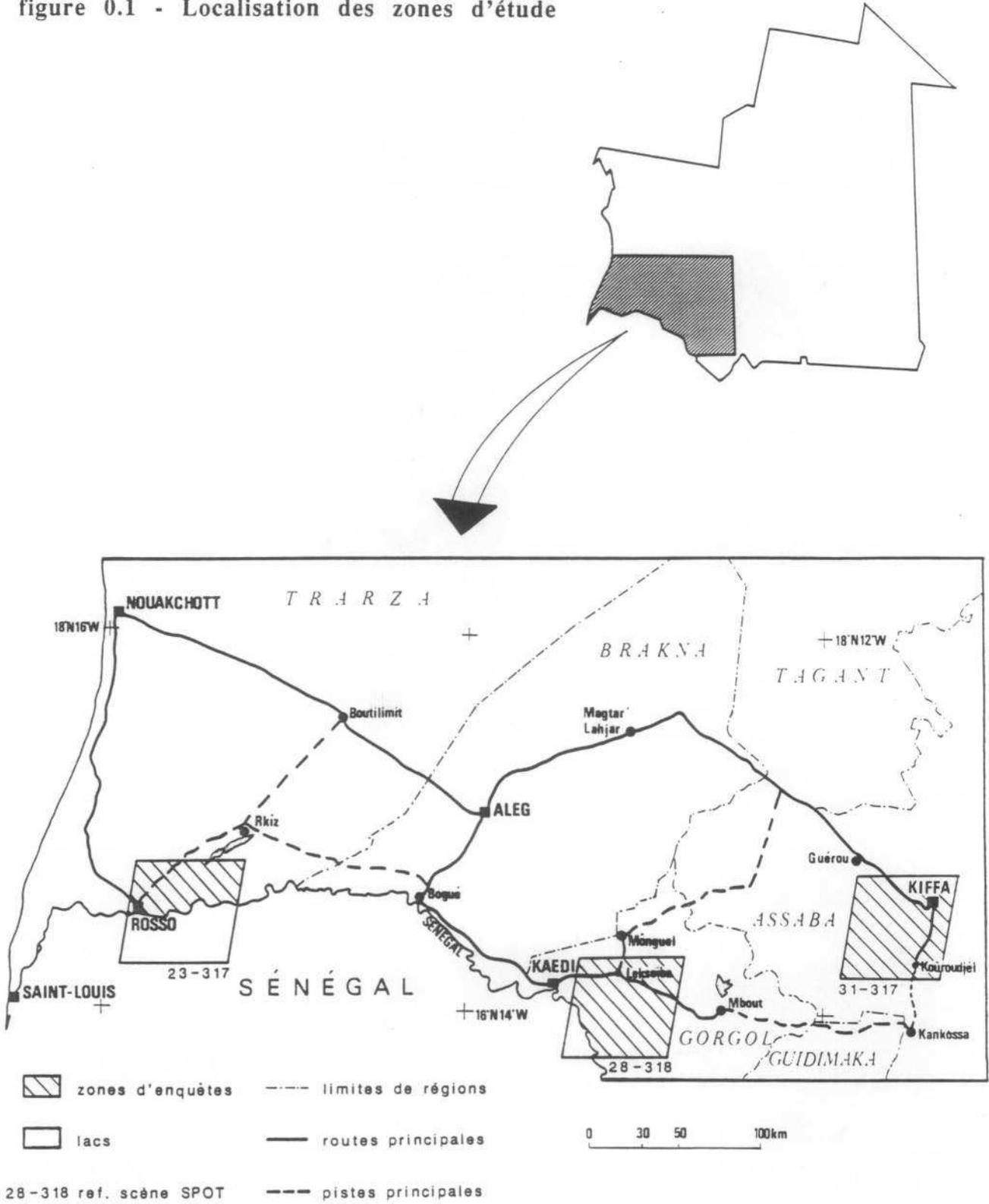
1PIQUEMAL-PASTRE 1980 p.636

2OULD EL HACEN 1989 p.138

3DESCHAMPS 1980 p.352

4CARRIERE 1989 p.7

figure 0.1 - Localisation des zones d'étude



Travailler sur un terrain d'étude vierge est enthousiasmant, mais lorsqu'il s'agit de mettre au point une méthode de collecte, le manque de données connexes auxquelles il est utile de se référer pour tester son modèle fait cruellement défaut. Il est alors préférable de l'expérimenter sur un site connu par ailleurs. Cette solution a été adoptée par une équipe de l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) pour l'estimation de données démographiques en milieu urbain par télédétection. O. Barbary¹, un des membres de cette équipe qui comptait entre 4 et 9 personnes, a d'abord testé la fiabilité de son modèle sur Marseille, avant de l'appliquer à la ville de Quito, son objectif réel. Cette démarche ne nous a pas été possible par manque de temps et de moyens (financiers et humains).

Il nous a donc fallu bâtir un protocole de recherche, inspiré de méthodes ayant fait, pour partie, leurs preuves dans d'autres milieux. Méthodes, que l'on pouvait adapter aux situations les moins favorables, d'un point de vue ressources documentaires, essentiellement, mais aussi les plus fréquentes, c'est-à-dire : absence de toutes données fiables et récentes autres que l'imagerie satellitaire. Cette hypothèse de recherche, dite "**hypothèse minimaliste**", devait convenir à l'ensemble des problématiques d'étude du milieu naturel en zone tropicale sèche associant **des enquêtes de terrain et la télédétection**, en sachant que l'on pouvait améliorer le rendement de ces enquêtes, dès lors que l'on disposait d'informations diversifiées. En leur absence, seule l'enquête de terrain peut permettre de valider les données satellitaires. Tel a été le cas de cette étude dans le Sahel sud-mauritanien.

De nombreuses méthodes d'enquête de terrain ont déjà été testées en milieu agricole tempéré, plus rarement en milieu naturel. Elles ont, essentiellement, utilisé la photographie aérienne comme document d'appui pour permettre à l'enquêteur de se localiser, positionner les relevés, mesurer les superficies, etc. Si dans l'estimation des superficies la photographie aérienne est très performante (un très bon aperçu en est fourni par les fascicules méthodologiques publiés par le ministère français de l'agriculture²) en revanche, c'est un moyen d'inventaire statique. Elle permet certes, la reconnaissance de formations végétales à partir d'unités types mais elle n'autorise pas la quantification du couvert herbacé dans le cadre d'une évaluation des ressources en pâturages naturels. Elle ne peut donc pas être utilisée pour suivre la dynamique de formations végétales.

De plus, l'interprétation analogique est très sensible à "l'œil" du photointerprète. Il est communément admis qu'un glacis ou une zone de contact savane-forêt, par exemple, ne verront pas leur extension délimitée de la même façon

1BARBARY 1988

2FOURNIER 1972 et 1986 pour les statistiques agricoles ou encore CHEVROUX 1988 pour l'inventaire forestier

par deux photointerprètes différents. Il faudrait donc recourir à plusieurs photointerprétations successives pour pouvoir d'une part limiter l'erreur d'observation et d'autre part estimer la précision de l'estimateur de superficie des différents postes d'occupation du sol, la fidélité et la fiabilité de la photointerprétation sont à ce prix, bien peu acceptent de le payer.

Au moins deux arguments nous ont fait recourir aux traitements numériques sur images satellites.

Le premier est lié à l'ancienneté de la couverture photographique aérienne de la Mauritanie. La couverture complète date du milieu des années cinquante. Le paysage et la végétation ont subi de trop profondes modifications (2 à 3 sécheresses accentuées pendant ces 20 dernières années) pour espérer utiliser de manière fiable ces prises de vue tant sur le terrain que lors du contrôle des traitements statistiques et cartographiques.

Le deuxième tient au fait que nous souhaitons proposer une méthode dont une grande partie des étapes de recherche soient automatisables. Or, la photointerprétation ne permet pas d'automatiser le travail sur les documents d'appui de type photos ou imagerie satellitaire analogique.

La modélisation et l'automatisation font partie du processus de simplification indispensable pour envisager un transfert méthodologique vers les aménageurs sahélo-soudaniens. Actuellement, peu de méthodes réunissent les qualités nécessaires, fiabilité, réitérabilité, etc., elles n'ont pas en général été développées pour le milieu naturel et encore moins pour le Sahel.

Dans la mesure où toute recherche méthodologique a besoin d'un substrat pour se développer, nous allons décrire en première partie celui qui nous a accueilli pour mener à bien celle-ci. Seront successivement abordés, l'homme, le climat, le milieu et l'étude du couvert végétal.

Dans la deuxième partie, axée sur la problématique de ce travail, les méthodes usuelles d'enquête seront analysées. A la suite de quoi, nous proposerons la méthodologie d'inventaire qui nous semble la plus adaptée au milieu naturel sahélien.

Enfin dans la troisième partie, la méthode d'inventaire proposée sera appliquée à deux zones tests du Sahel sud-mauritanien et les résultats analysés.

MISE AU POINT TERMINOLOGIQUE

La géographie, comme de nombreuses autres sciences, utilise un vocabulaire qui est loin d'être communément admis. L'emploi de techniques spécialisées, comme dans notre cas la télédétection ou les méthodes de sondage, favorise l'apparition d'un jargon incompréhensible pour le profane. Nous essayerons, autant que faire se peut, d'en limiter l'usage. Certains termes restent cependant incontournables, cette mise au point terminologique en est le corollaire.

La notion d'**occupation du sol** (ou des sols), a priori, ne pose pas de problème de compréhension. Elle est toutefois proche du concept d'**utilisation** du sol (ou des sols). Il semble donc nécessaire de clarifier le sens que nous lui réservons ici. L'occupation du sol «...se limite strictement à la description des éléments situés au sol, [alors que] l'utilisation du sol est enrichie d'informations relatives aux activités et à l'usage ou à la fonction des objets repérés »¹. L'occupation du sol est un descripteur du paysage, alors que l'utilisation du sol est un descripteur de l'usage. On en prendra pour exemple la dénomination d'un poste d'occupation du sol de type "steppe herbeuse sur ondulation dunaire", qui dans une version utilisation du sol devient "pâturage de fin de saison des pluies".

Cette notion d'occupation du sol repose sur une nomenclature ou liste d'états de paysages susceptible d'être identifiée lors d'un inventaire. Plusieurs nomenclatures font référence. La plus connue est peut-être la nomenclature de base d'Anderson utilisée par les services de l'United States Geological Survey (USGS). Celle-ci a fait l'objet d'un compte rendu détaillé dans une étude sur l'aménagement et la télédétection réalisée par l'Opération Pilote Interministériel de Télédétection² (OPIT). Il s'agit d'une nomenclature à niveaux emboîtés, valable pour l'ensemble du territoire américain et ensuite adaptée à d'autres pays : Canada, Japon, Grande-Bretagne, ...

Le principe est de découper le territoire en grandes catégories [...], Forêt (4), Eau (5), Zones humides (6), etc.], c'est le niveau 1 de la nomenclature. Puis dans un deuxième temps, chaque catégorie est subdivisée en sous-catégories. Les zones humides deviennent par exemple : Zones humides boisées (61) ou Zones humides non boisées (62), c'est le niveau 2 auquel peut succéder un niveau 3, etc.

Cette nomenclature est adaptée au grand parcellaire nord-américain et peut apparaître rigide dans des secteurs morcelés et contrastés. Surtout si le satellite ne peut permettre d'accéder aux sous-catégories en raison de sa faible résolution.

¹AUDRAIN 1989 p.8

²BIED-CHARRETON 1977 : 40-48

En France, le Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques (SCEES) du ministère de l'agriculture utilise lui aussi une nomenclature emboîtée pour les enquêtes d'utilisation du territoire (TER-UTI). Celle-ci est cependant subdivisée en deux types de nomenclature¹, l'une est physique, l'autre est fonctionnelle.

L'observation physique détermine l'occupation du sol sur la portion de territoire enquêtée, tandis que l'observation fonctionnelle renseigne sur l'utilisation du sol. De même, ces deux nomenclatures sont subdivisées en niveaux et sous-niveaux. Adaptée à l'origine pour des enquêtes par photographie aérienne, la nomenclature TER-UTI est elle aussi très contraignante lors d'une utilisation avec la télédétection.

En théorie toute la "nomenclature physique" est accessible par télédétection, à résolution satellitaire et nomenclature compatible. En revanche, seule une partie de la nomenclature fonctionnelle l'est. L'utilisation agricole d'une culture est pratiquement acquise, mais pour d'autres postes, seule l'enquête de terrain peut apporter l'information nécessaire.

Cette approche articulée sur deux niveaux de perception du paysage nous est apparue intéressante, nous l'avons donc retenue pour notre propre usage. Cependant, dans un souci de simplification nous avons regroupé dans l'appellation générique "occupation du sol" les deux concepts. Nous rejoignons en cela la plupart des services de statistiques agricoles européens², qui utilisent ce terme de façon générique.

Notons, comme le souligne P. Gondard³, que l'occupation du sol n'est pas la résultante de la seule cartographie des sols mais bien d'un inventaire de l'ensemble des ressources naturelles, voire humaines. Cette thématique n'est donc en aucun cas la chasse gardée des pédologues mais plutôt un lieu de rencontre de nombreuses compétences.

Les nomenclatures de l'USGS et du SCEES, pour ne citer qu'elles, ne sont pas adaptées aux paysages du milieu naturel sahélien. En l'absence d'une codification de référence, comparable à celles existantes pour certains milieux tempérés, il convient de préciser les descripteurs utilisés pour déterminer nos classes d'occupation du sol. Pour cela, certains termes doivent être définis.

A travers l'imagerie satellitaire, le milieu, qu'il soit naturel, agricole ou urbain, sera défini en types de paysage plus ou moins homogènes et complexes. Ces

¹ABDELLI 1986 : 16-17

²IAT 1989 p.6

³GONDARD 1988 p. 15

"paysages" doivent s'entendre au sens radiométrique¹ du terme. Ils concernent des zones ayant une certaine homogénéité radiométrique, zones pour lesquelles sera ensuite recherchée la signification thématique.

C'est la combinaison de ces paysages radiométriques avec le niveau de hiérarchie géographique, tel que défini par G. Long², qui va permettre une première approche de la nomenclature. La version définitive ne sera obtenue qu'après confrontation de la carte des états de surface avec la réalité du terrain.

L'état de surface est, comme le définissent M. Bruneau³ et alii, «... *l'ensemble des caractères propres à la surface de la terre susceptibles d'être détectés depuis un satellite ou un avion.*». C'est une première analyse écologique du milieu naturel qu'il est possible d'interpréter cartographiquement. En raison de leur proximité sémantique, les notions de **paysage radiométrique** et **d'état de surface** seront utilisées indifféremment l'une pour l'autre.

La cartographie est un des volets de l'inventaire d'occupation du sol, l'autre étant les statistiques. La liaison entre ces deux domaines est assurée, comme nous le verrons plus loin, par la télédétection⁴. Celle-ci permet d'intégrer une nomenclature commune de description des classes ou catégories d'occupation du sol, que ce soit dans le volet statistique ou cartographique de l'inventaire.

Les cartographes utilisent alternativement les termes **taxons** ou **thèmes** pour désigner les catégories représentées. Bien que, pour certains, cela soit un abus de langage, nous les utiliserons aussi avec cette acception.

En ce qui concerne les aspects statistiques, enquête de terrain et télédétection, les termes techniques seront définis au fur et à mesure de leur apparition dans le corps du texte. Seules quelques expressions dépassant leur simple cadre technique vont être définies ici.

Il sera souvent question dans ce travail de **sondages spatiaux**, encore appelés **méthodes aréolaires**, et de **segments d'enquête**. Les méthodes aréolaires font référence à «*l'unité de sondage au dernier degré [qui] est une "aire" géométrique ...*»⁵, cette aire est appelée segment. Le segment n'est pas une portion de droite mais, ici, une portion de territoire⁶ formée de parcelles contiguës. Il faut entendre par parcelle un élément du paysage au sens large, c'est-à-dire l'emprise au

¹BIED-CHARRETON 1977 p.45

²LONG 1974 : 47-58

³BRUNEAU 1984 p.8

⁴MEYER-ROUX 1981c p.9

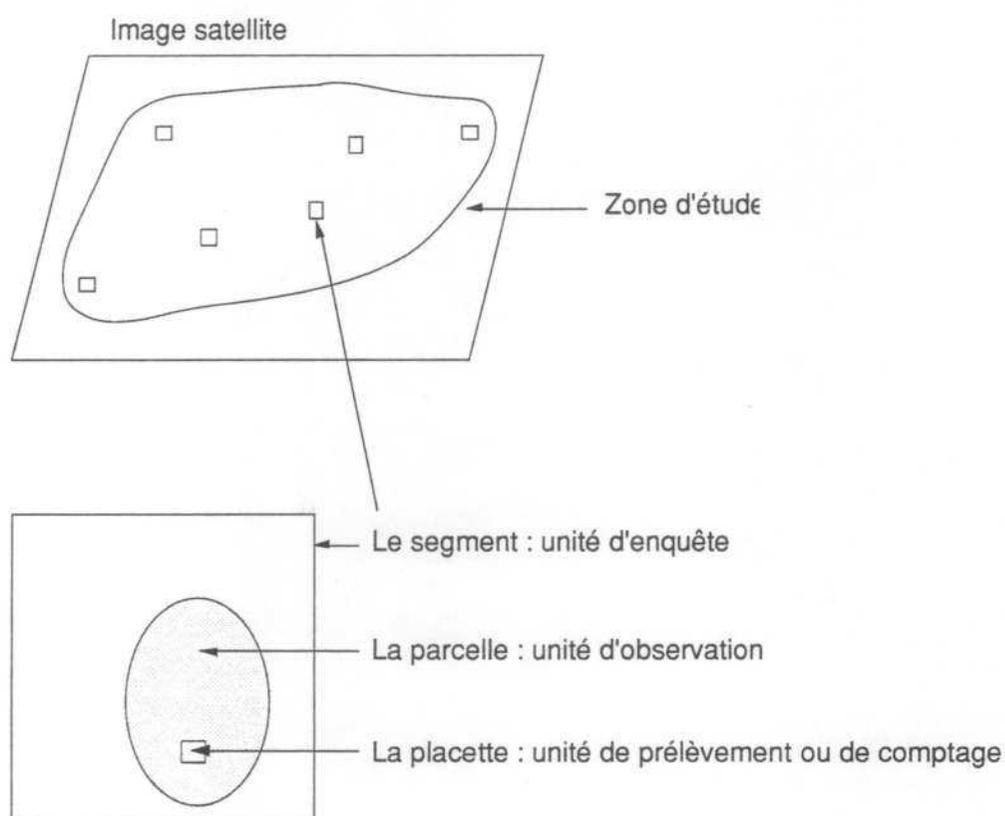
⁵DESABIE 1966 p.117

⁶FOURNIER 1985a p.8

sol d'un thème quelconque bordé d'autres thèmes, et pas uniquement une parcelle au sens agricole du terme.

On retiendra donc que le segment est l'unité d'enquête, encore appelée unité d'échantillonnage, à l'intérieur duquel en général plusieurs parcelles constituent les unités d'observation (cf. fig. 0.2). La parcelle est le lieu des observations qualitatives, comme la physionomie du paysage. A l'intérieur de celle-ci, il est parfois réalisé des observations quantitatives, comme les mesures de biomasse (cf. 2.2.). Ces observations ont lieu au niveau de la placette, encore appelée placeau.

figure 0.2 - Le segment et ses subdivisions



Par extension, les mesures de surface seront appelées "**mesures qualitatives**", car elles sont exclusivement déterminées sur un critère qualitatif tel que la présence ou l'absence d'une catégorie de paysage à l'endroit considéré. En revanche, et à l'exclusion des seules mesures de surface, toutes les mesures de quantités, comme celles de la phytomasse herbacée ou des volumes ligneux, seront appelées "**mesures quantitatives**".

Contrairement à ce que l'on trouve parfois dans la littérature, nous avons retenu le terme unité d'observation pour la parcelle et non pour le segment, car les observations sont réalisées au niveau des parcelles. Le segment est une unité

statistique issue de l'échantillonnage. Il n'est pas le lieu des observations, car dans la majorité des cas il est hétérogène, il regroupe plusieurs thèmes, alors que les parcelles qu'il réunit dans ses limites sont homogènes et donc monothématiques.

Nous ne serions pas complet si nous n'évoquions pas en quelques mots la terminologie utilisée pour décrire la teneur d'un enregistrement satellitaire. Dans notre cas, il s'agit d'un certain type de rayonnement électromagnétique et non d'imagerie analogique comme pour la photographie classique, aérienne ou non.

D'une manière générale nous parlerons de **radiométrie** pour évoquer le rayonnement enregistré par le capteur du satellite. Ce rayonnement est souvent codé sur huit bits, soit 256 niveaux. Cela signifie que la valeur du pixel, ou **valeur spectrale**, est comprise entre 0 (absorption maximale) et 255 (réflexion maximale) pour chaque canal. Si les données sont "brutes", c'est-à-dire qu'elles n'ont pratiquement subi aucune correction ou calibrage, l'unité des valeurs spectrales est appelée **compte numérique**. Cela signifie que ces données ne sont comparables qu'avec elles-mêmes et qu'elles ne sont pas normalement utilisables sous cette forme pour faire de la quantification, d'où, parfois, l'intérêt d'un étalonnage ou d'un calibrage.

Les calibrages ou étalonnages les plus fréquents sont la mise en **luminance** ou la mise en **réflectance** des données radiométriques. F. Verger¹ rappelle que : *«la luminance dépend beaucoup de l'éclairage incident tandis que la réflectance, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie incidente et l'énergie renvoyée, dépend beaucoup moins de l'ambiance et caractérise véritablement le milieu, quel que soit le rayonnement solaire reçu.»*

La luminance permet soit de comparer dans le temps un instrument en dépit de son vieillissement soit de comparer deux instruments ayant les mêmes caractéristiques², alors que la réflectance permet de comparer deux capteurs différents ou bien encore de quantifier une variable continue comme la production fourragère. La luminance est une mesure d'énergie exprimée en watts par mètre carré et par stéradian ($W/m^2/sr$)³, tandis que la réflectance n'a pas de grandeur⁴.

Dans cette étude, nous ne précisons le niveau de calibrage des radiométries que lorsqu'il sera nécessaire de recourir aux luminances ou aux réflectances. Dans la plupart des cas, il est tout à fait possible de travailler directement sur les données fournies par l'organisme de diffusion, même avec un niveau de pré-traitement radiométrique très faible.

¹VERGER 1982 p.73

²SPOT 1986 p.2-49

³PAUL 1982 p.79

⁴CASSANET 1984 p.37

Enfin, il sera parfois fait allusion à des néo-canaux du type Indice de Végétation (IV) ou Indice de Brillance (IB). Il s'agit des combinaisons réalisées à partir des enregistrements satellitaires d'origine, combinaisons accessibles sur notre système de traitement d'images¹ Péricolor 2 001. Ces indices sont les maintenant très classiques :

$$IV = \frac{XS3 - XS2}{XS3 + XS2}$$

$$IB = \sqrt{XS3^2 + XS2^2}$$

avec :

XS3 canal du proche infra-rouge de SPOT [0,61 μm ; 0,68 μm] ;

XS2 canal du rouge de SPOT [0,79 μm ; 0,89 μm].

¹NUMELEC 1987 p. VI-2-1

PREMIÈRE PARTIE

L'homme et le milieu

A l'origine de ce travail, nous devions étudier plusieurs systèmes agropastoraux du sud de la Mauritanie, mais cette recherche en géographie tropicale s'est rapidement retrouvée avec une forte orientation méthodologique. En voici deux raisons.

Premièrement, nous n'avons pas trouvé d'unité de gestion pastorale intéressée par notre projet de collaboration. Ce projet consistait à utiliser la zone de gestion d'un groupement d'éleveurs pour réaliser un inventaire des parcours puis émettre quelques propositions de restauration et d'aménagement. Deuxièmement, nous avons constaté que les outils dont disposait le chercheur pour réaliser ses inventaires souffraient de nombreuses carences (forte subjectivité inhérente au processus de collecte, faible représentativité, etc.).

Tout cela a orienté cette recherche, axée à l'origine sur l'évaluation et la valorisation des ressources pastorales, vers une mise au point d'outils pour les inventaires d'occupation du sol. Cependant, la recherche méthodologique n'est pas éloignée des préoccupations du géographe, car celui-ci a besoin d'outils fiables, simples et précis pour inventorier le milieu. Or en l'absence de ceux-ci qui d'autre que lui est le plus à même de les réaliser ?

Cette recherche d'outils opérationnels conditionne en partie notre approche du milieu. En effet, que ce soit lors de la description du climat, du modelé, de la végétation, etc., nous avons toujours le souci d'apprécier l'interaction de ces éléments sur la méthodologie d'inventaire et donc leur influence sur l'enquête de terrain ou l'intérêt et les possibilités de prises de vue satellitaires.

De ce fait, on ne trouvera pas dans la description du milieu proposée ici une monographie sur telle ou telle zone sahélienne, mais plutôt un aperçu concis des secteurs d'étude. Celui-ci se veut d'ailleurs léger pour démontrer qu'une connaissance approfondie du milieu n'est pas un préalable indispensable pour mener à bien un inventaire d'occupation du sol¹.

Nous allons envisager l'analyse du milieu d'accueil sous quatre aspects :

- les partenaires de cette recherche ;
- le climat, son évolution et son influence sur l'inventaire du milieu ;

et enfin,

- l'environnement dans son aspect minéral et végétal.

¹FOURNIER 1986 p.13

1. L'HOMME ET LE TROUPEAU

L'inventaire qui a servi de support à cette recherche¹ devait à l'origine se dérouler sur le terroir d'une ou plusieurs associations pastorales dûment identifiées et en concertation avec ses éleveurs et agro-éleveurs. Les associations pastorales sont des entités de gestion de taille assez variable sur lesquelles "nomadisent" des fractions ou des tribus de manière plus ou moins traditionnelle.

G. Boudet², toujours dans le cadre de l'étude pour la Banque Mondiale, en a étudié cinq parmi les 46 délimitées en 1988 en Mauritanie. Elles couvrent en moyenne 300 000 ha chacune, soit l'équivalent d'une image SPOT. C'est donc à peu près les dimensions de ce type d'entité que nous avons envisagées pour réaliser notre inventaire. Cependant, il ne nous a pas été possible d'identifier dès le début du projet support (septembre 1987) les associations pastorales avec lesquelles nous puissions collaborer.

De ce fait, les travaux ont commencé sur des secteurs choisis uniquement pour leur intérêt physique (essentiellement végétal) et non plus humain. Des associations pastorales ont de ce fait été privées des résultats d'un travail d'inventaire exploitable pour leur propre gestion, et nous, mais cela a moins d'importance, de l'intégration de l'homme et du troupeau dans la problématique d'inventaire. Nous n'avons donc pas tellement "fouillé" l'approche humaine.

Bien que ce travail d'inventaire soit normalement destiné à dresser un état des lieux, nous ne perdons pas de vue que la fiabilité du diagnostic qu'il offre à un instant donné n'est pas une fin en soi. Il doit permettre en aval une gestion du milieu qui assure, aux agro-éleveurs du secteur concerné, un renouvellement des ressources pastorales, c'est-à-dire aussi bien les ressources fourragères que le bois de feu, etc. Dans ces conditions, il est important de connaître les populations qui vivent sur la zone d'étude, leurs activités, la nature du cheptel, etc.

1.1. ÉVOLUTION DU PEUPELEMENT MAURITANIEN

Il n'est pas question de traiter ici en quelques lignes l'histoire de la Mauritanie, mais seulement de rappeler quelques faits qui, à la lumière des événements actuels, justifient l'étude des populations concernées lors de la réalisation d'un inventaire.

¹DE WISPELAERE 1989

²BOUDET 1990

1.1.1. Rappel historique

L'occupation humaine en Mauritanie semble attestée depuis le paléolithique¹. Elle est le fait de chasseurs et de pêcheurs. La révolution néolithique se produit au Nouakchottien (- 6 000 BP) et comme dans tout le Sahara méridional, elle concerne essentiellement des populations négroïdes. La phase de dessèchement qui intervient à la fin du Néolithique pousse ces premiers occupants vers le Sud. Ils sont alors remplacés par des Berbères éleveurs de dromadaires qui occupaient le Nord et la frange littorale².

A partir du XI^e siècle ces tribus berbères s'unissent temporairement dans le mouvement religieux des Almoravides. Ce mouvement ira des rives du Sénégal à l'Espagne³. De cette époque date l'islamisation profonde des berbères.

L'arabisation de la société commence suivant les auteurs entre le XII^e et le XVI^e siècle. Elle ne sera effective pour les populations blanches, les Beydanes, qu'à partir du XVII^e-XVIII^e siècle. Cette arabisation est le fait des tribus Bani Hassan. Elles ont donné leur nom au dialecte parlé en Mauritanie, le hassaniya. Seul, un îlot berbérophone subsiste au Trarza. Il comporterait encore quelques centaines de locuteurs⁴.

De cette arabisation linguistique et culturelle, la société maure est restée imprégnée jusqu'à aujourd'hui. Le mode d'organisation sociale traditionnelle s'apparente au système des castes. Toutefois, l'endogamie n'est pas la règle⁵ contrairement aux Sarakolés où elle est très stricte⁶.

L'unité sociale la plus importante est la tribu, mais elle est coiffée par l'émirat. Celui-ci représente une sorte d'état tribal caractéristique de l'identité régionale⁷. La tribu est de taille variable et se subdivise en fractions puis en familles ou tentes. Ces tribus sont réparties en ordre hiérarchisé statutairement. En principe, les tribus guerrières dominent les tribus maraboutiques. Le dominé paye un tribut au dominant. Beaucoup plus complexe que nous ne pouvons le décrire ici, la société

¹TOUPET 1977 p.52

²TAINE-CHEIKH 1988 p.XVI

³BONTE 1990 p.14

⁴TAINE-CHEIKH 1988 p.XIX

⁵TOUPET 1977 p.67

⁶TOUPET 1977 p.69

⁷BONTE 1990 p.14

maure comporte encore deux castes que nous voudrions évoquer, celle des affranchis et celle des esclaves.

La société maure traditionnelle vivait essentiellement du commerce, de l'élevage et de l'agriculture. Cependant, l'agriculture et une partie de l'élevage n'étaient pas directement pratiquées par les nobles Beydanes, elles étaient confiées aux affranchis, les Haratins, ou aux véritables esclaves, les Abds.

Les Haratins, ou Maures noirs, restent en général attachés à leurs anciens maîtres dont ils cultivent les champs, entretiennent les palmeraies ou conduisent les troupeaux. Ils vivent parfois loin de ceux-ci dans des campements autonomes. Enfin les esclaves, «... *que toutes les autres catégories sociales pouvaient posséder en plus ou moins grand nombre ...*»¹ étaient attachés à un campement où ils effectuaient toutes les tâches de la vie courante. Malgré trois abolitions de l'esclavage (!), la dernière remonte à 1980, il semblerait qu'actuellement il reste encore 100 000 esclaves "complets", soit 5 p.100 de la population, et 300 000 semi-esclaves et ex-esclaves².

Faute de pouvoir utiliser le dernier recensement de la population, il date de 1988 mais n'a jamais été publié, on estime que les Maures représentent un peu plus des deux tiers de la population soit, 40 p.100 pour les Maures noirs, 30 p.100 pour les Maures blancs. Les 30 p.100 restants sont constitués de populations négro-africaines³.

Ces populations négro-africaines résident dans leur grande majorité le long de la vallée du Sénégal. On peut distinguer trois groupes ethniques dont la répartition d'ouest en est est la suivante, les Wollofs à l'ouest, les Toucouleurs au centre et les Sarakolés au sud-est (cf. fig. 1.1).

Ces trois groupes sont à dominante sédentaire, non arabophones et très largement musulmans. Les Toucouleurs sont les plus nombreux, ils sont installés dans la vallée depuis très longtemps et y cultivent le wallo. La société toucouleur est organisée en communautés villageoises dont «*la stratification sociale est fondée sur des différences d'accès au sol et sur des groupes statutaires de spécialisation professionnelle (pêcheurs, artisans, etc.)*»⁴.

Les Sarakolés sont surtout localisés dans le Guidimaka, hors de notre zone d'étude. Ce sont des populations de langue soninké. La stratification y est aussi fonction des différences d'accès au sol. Enfin, les Wollofs ne sont qu'une petite

¹TAINÉ-CHEIKH 1988 p.XVIII

²PARINGAUX 1990 p.8

³BARRIN 1991

⁴BONTE 1990 p.14

communauté d'agriculteurs surtout localisés vers le delta et donc peu représentés dans la zone d'étude.

Quant aux Peuls, ils ont été représentés sur la figure par la limite nord de leurs zones de pâturages traditionnels. Cette limite est probablement située plus au sud que les dernières zones de nomadisation fréquentées par les Peuls (avant avril 1989 cf. *infra*). Elle provient de l'étude de P. Bonte¹ qui lui-même signale des implantations plus septentrionales.

figure 1.1 - Répartitions des différents groupes ethniques



sources : d'après P. BONTE 1990 p.14 et 19

.. Il serait plus exact de parler des groupes peuls car ceux-ci sont au nombre de trois avec une répartition géographique assez différente. P. Bonte² rappelle que leur venue sur la rive droite du Sénégal fait partie du mouvement de réoccupation par les populations halpoularen de leurs anciens terroirs. L'insécurité que faisaient régner les Maures jusqu'à la colonisation les avait fait refluer sur la rive gauche. L'implantation peule est donc relativement récente, elle s'est développée au nord du fleuve, du Trarza à l'Assaba et jusqu'au Tagant, en fonction des terres libres et des pâturages. Deux facteurs sont venus interrompre ce déploiement de population, voire le faire refluer.

¹BONTE 1990 p.19

²BONTE 1990 p.14

Le premier, par ordre chronologique, est lié à l'accentuation de la sécheresse qui a contraint éleveurs et agriculteurs, toutes communautés confondues, à se replier vers le sud puis à se sédentariser sur place. Le second, dont on peut penser qu'il est en partie la conséquence du premier, est lié aux événements d'avril 1989. C'est ces deux aspects que nous allons maintenant rapidement évoquer.

1.1.2. Migrations internes, sédentarisation et conflit

Très fortement ruraux, les Mauritaniens sont en train de devenir comme de nombreux autres Africains des citadins. En 1945, ils étaient à 98 p.100 "en brousse". En 1962, deux ans après l'indépendance, ils étaient déjà 7 p.100 à avoir rejoint les villes, Nouhadibou, Zouérate et le long du fleuve, Kaédi et Rosso. En 1977, on dénombre 22 p.100 de citadins et en 1988 c'est pratiquement 40 p.100 de la population qui a quitté la brousse pour venir s'entasser dans des conditions plus que précaires en ville. Nouakchott, bien sûr, participe à cet essor. De 138 habitants en 1946, elle ne deviendra capitale qu'en 1959, elle atteint 5 000 h en 1962, 130 000 en 1977 et plus de 300 000 en 1990¹. Près de 30 p.100 de la population mauritanienne citadine est à Nouakchott.

Or, les migrants chassés par la sécheresse ne se sont pas tous "installés" en ville, un certain nombre se sont dirigés vers les zones agricoles. Cette sédentarisation massive, «*nomade à 85 p.100 en 1967, le pays ne l'était plus qu'à 17 p.100 20 ans plus tard.*»², n'a pas contribué à apaiser les tensions latentes dans les zones de migrations, essentiellement la vallée du fleuve.

Les tensions qui agitent la Mauritanie semblent aussi anciennes que la population elle-même et caractérisent particulièrement la région du fleuve. A. Kane³ les explique comme suit : «*les rapport de clientèle ou de dépendance introduits dans la société maure par l'élevage et l'exploitation des oasis (Adrar, Tagant, Assaba) se détériorent et conduisent à des tensions sociales (possédants-clients), politiques (tribus guerrières-tribus maraboutiques), raciales (Noirs-Maures blancs).*».

A cela est venue s'ajouter une dimension économique avec la mise en service des barrages de Diama et Manantali. Ils permettent en effet de développer les cultures irriguées. Or pour réussir cette politique de développement agricole, l'état s'est doté d'une loi foncière (ordonnance du 5 juin 1983) qui a mis fin aux systèmes traditionnels de tenure du sol, systèmes qui étaient basés sur la reconnaissance des

¹BADUEL 1990 p.167

²BADUEL 1990 p.168

³KANE 1989 p.134

droits fonciers coutumiers collectifs et individuels des différentes communautés. Cette loi a entraîné la privatisation de nombreuses terres de wallo «... *appartenant, selon le droit coutumier, aux communautés agricoles noires des deux rives du fleuve et les redistribua à de nouveaux propriétaires, tous maures.*»¹.

Une partie des Maures sus-cités sont des employés licenciés par la Société Nationale des Industries Minières (SNIM). Leur mise à pied a été accompagnée, sans contrepartie financière, d'un octroi de terres agricoles dans la vallée². Cependant, il semblerait qu'une partie de ceux-ci aient été dans l'incapacité financière de faire face aux frais d'équipement inhérents aux cultures irriguées et qu'ils aient très rapidement revendu leur lopin à de plus riches Beydanes ayant accès aux prêts des banques des pays arabes. Globalement, fin 1988, 8 000 ha avaient déjà été distribués³. Quoi qu'il en soit, le conflit inter-ethnique puis inter-état qui s'en suivit est resté dans les mémoires et ne semble pas près d'être réglé.

Peu d'informations ont filtré, mais il semble toutefois que la recomposition ethnique a été importante dans les régions jouxtant le fleuve. Ph. Cottereau⁴, citant un médecin des Volontaires de Progrès rentrant de Kaédi (date non précisée), indique que les mouvements de population vont dans les deux sens et touchent toutes les ethnies. Pour la seule ville de Kaédi, 100 familles non maures (environ 500 personnes) ont été expulsées. Dans le même temps, sept camps de réfugiés maures se sont installés au NE de la ville (environ 700 à 800 personnes). Les villages avoisinants semblent avoir vécu des situations comparables.

Tout laisse à penser que le mode d'exploitation agropastorale que nous avons connu sur les zones d'étude a dû beaucoup évoluer. En effet, ce sont des agro-éleveurs qui ont été chassés de Mauritanie et ce sont des commerçants⁵ qui sont venus du Sénégal. Même si les Peuls ont dû abandonner tout ou partie de leur troupeau en se faisant expulser, les Maures sénégalais ne les ont certainement pas tout de suite remplacés. Une certaine vacance a dû avoir lieu. Quel a été son impact sur le milieu ?

Cette question est importante, car l'exploitation du milieu et donc sa dégradation éventuelle dépendent du mode de gestion agropastorale de l'espace. Dans la mesure où la pression humaine et animale (domestique) ont décliné, il est fort possible que l'on assiste à une régénération de certaines formations végétales très atteintes par le surpâturage. Les résultats qui sont présentés aux chapitres 8 et 9 ne tiennent pas compte de la possible déprise du milieu.

¹BESSIS 1990 p.516

²FRITSCHER 1987 p.5

³KANE 1989 p.135

⁴COTTEREAU 1990 p.266

⁵BADUEL 1990 p.168

Alors qu'il est difficile de conclure sur le peuplement actuel de la Mauritanie, en raison des bouleversements que nous venons d'évoquer, il paraît important de s'interroger sur l'utilité d'une analyse des facteurs humains dans un inventaire d'occupation du sol en milieu tropical. Lors de périodes moins troublées, cette analyse permet-elle d'aller plus loin que la simple description des ethnies en présence ? C'est ce que nous allons tenter de voir maintenant.

1.2. ASPECTS SOCIAUX

A quoi cela sert-il d'étudier les facteurs humains dans un inventaire d'occupation du sol ?

A rien, si l'inventaire est conçu comme une fin en-soi. Pour provocante qu'elle soit, cette réponse est le reflet de la finalité de trop nombreuses études qui n'ont pas trouvé d'application pratique donc d'utilisateurs. Or, les inventaires qui ont servi de support à cette recherche méthodologique font partie des études qui n'ont pas eu de retombées réelles pour les populations concernées. L'absence de partenaire mauritanien en est probablement la principale raison.

Pour éviter que ne se reproduise ce type de malentendu, même pendant les phases d'expérimentation méthodologiques, il convient de s'interroger sur la finalité de l'inventaire pratiqué.

1.2.1. Mise en valeur du terroir agropastoral

Il n'est pas question de développer ici les différents aspects de la mise en valeur rationnelle d'un terroir agropastoral. C'est à l'aménageur, au développeur, à l'agronome d'élaborer des propositions qui viseront à préserver le milieu, voire permettront sa régénération, tout en alimentant les troupeaux présents. De même, c'est à eux d'adapter l'agriculture aux contraintes du climat, des sols et aussi des compétences des populations présentes. Cependant, pour leur permettre cette mise en valeur, il leur faut un diagnostic le plus complet possible.

En cela, la notion de mise en valeur développée par G. Boudet¹ est intéressante. Celui-ci se place dans une optique de modernisation de l'élevage (mais elle peut précéder n'importe quelle mise en valeur) où toute intervention doit se faire «... en tenant compte de son emprise sur les activités voisines, afin de maintenir un équilibre souhaitable avec les diverses spéculations possibles.». Car comme nous

¹BOUDET 1984 p.136

venons de le voir, modifier les équilibres traditionnels d'une région peut avoir des conséquences incalculables (cf. 1.1.2.). Une mise en valeur rationnelle doit donc obligatoirement étudier toutes les ressources du milieu, dont les ressources humaines.

Pour cela, toujours d'après G. Boudet, cette phase de mise en valeur doit être précédée de quatre analyses :

- inventaire et cartographie des ressources fourragères ;
- inventaire des ressources en eau (surface et profondeur) ;
- inventaire du cheptel, avec sa composition ;
- recensement des populations fréquentant régulièrement le terroir.

A cela, il faut ajouter, pour les milieux qui s'y prêtent, l'inventaire des ressources agricoles.

En résumé, la procédure d'inventaire préconisée par G. Boudet se divise en deux parties, l'une concerne l'aspect physique de l'enquête et l'autre l'aspect humain. Ce dernier apporte évidemment une contrainte d'investigation supplémentaire. Il ne se déroule pas forcément au même moment que l'inventaire "physique" et d'autre part, il ne réclame pas les mêmes compétences.

En effet, le calendrier de l'enquête sociologique va devoir prendre en compte la présence ou l'absence des populations sur le terrain d'enquête. Ce point, qui n'avait aucune importance pour l'enquête d'occupation du sol, devient dès lors fondamental.

Dans le cas d'agro-éleveurs, ce n'est peut-être pas une mais plusieurs enquêtes qui vont devoir être menées car les bergers, les propriétaires, les agriculteurs ne sont pas tous présents en même temps sur la zone d'étude. Certains sont même absents plusieurs mois, voire plusieurs années, avec leur troupeaux si les conditions locales ne sont pas favorables tout en se tenant prêts à revenir à la moindre amélioration des pâturages. Il faut en tenir compte avant de proposer un quelconque projet de gestion. Il en va de même des champs de diéri, actuellement partiellement ou totalement abandonnés (cf. 2.1.2. et 3.3.1.), qui n'attendent qu'une amélioration des précipitations pour voir leurs anciens exploitants réapparaître, etc.

On comprend mieux, à la suite des quelques contraintes précédemment énumérées, que l'approche humaine ne soit pas plus souvent pratiquée, car elle est très contraignante. Elle n'est probablement pas praticable en l'absence d'une bonne connaissance des populations enquêtées, langues, traditions, religions, etc.. Rien

n'est pire que de dépendre d'un interprète qui, par exemple, entretient avec ses interlocuteurs des relations de dominant à dominé, ou le contraire.

Dans la mesure où l'enquête sociologique est possible, certaines avancées vers la gestion du milieu peuvent être envisagées. Cette enquête permettra de dépasser le simple inventaire d'occupation du sol.

1.2.2. Perspectives

Dans le cadre de l'élevage transhumant tel qu'il est pratiqué au Sahel, les habitudes de la majorité des bergers sont assez bien connues. Un certain nombre d'ouvrages renseignent sur le mode de conduite du troupeau tout au long de l'année en vue de lui assurer une alimentation variée, une cure salée lorsqu'elle est nécessaire et une hydratation régulière, tout cela en fonction des potentialités du milieu. Cependant, toutes ces connaissances ne sont pas forcément acquises sur la majorité des zones arides.

Comme le souligne G. Boudet¹, l'exploitation des pâturages est avant tout tributaire de la disponibilité en eau. En fin de saison des pluies, les mares permettent l'abreuvement et donc l'exploitation des pâturages avoisinants. L'avancé de la saison sèche tarit les mares et oblige le troupeau à se rapprocher des puits sur nappe de plus en plus profonde et des grands cours d'eau. Les pâturages que le troupeau peut encore atteindre sont fonction de la composition de celui-ci.

Si le chameau, dans notre cas le dromadaire, peut être abreuvé tous les trois jours, voire tous les huit jours, le bovin moyen et les petits ruminants ne semblent pas pouvoir dépasser une abstinence de plus de deux jours². De même, si le chameau peut parcourir des distances considérables entre deux abreuvements, on considère qu'il ne faut pas imposer des distances au point d'eau supérieures à 15 km pour les bovins³ et petits ruminants, soit 30 km entre deux abreuvements. Notons que les bovins présents sur les zones d'étude sont de l'espèce zébu (*Bos indicus*) et que l'on regroupe habituellement sous l'appellation petits ruminants les ovins et les caprins.

Dans la mesure où notre objectif est de permettre une meilleure gestion du milieu, la connaissance du volume et du type des troupeaux fréquentant la zone d'étude est importante. Elle seule peut permettre de rechercher l'adéquation entre les

¹BOUDET 1984 p.134

²COULOMB 1980 p.118

³COULOMB 1980 p.112

résultats de l'inventaire d'occupation du sol, et surtout sa composante ressource pastorale, et la charge animale probable pour la saison à venir.

Un diagnostic de l'état de l'environnement reste statique s'il n'est pas assorti de l'étude des paramètres humain et animal. En effet, comment analyser l'ampleur de la raréfaction des pâturages de décrue dans la vallée du fleuve Sénégal¹ (liée à la maîtrise de l'inondation) si l'on ne dispose pas de documents cartographiques qui mettent en parallèle les pâturages de décrue avec leur charge potentielle et la charge animale présente en saison sèche. Or pour cela, le seul inventaire d'occupation du sol ne suffit pas, il faut qu'il soit doublé de l'étude des comportements humains. En effet, face à cette situation quelle va être la réponse des éleveurs ? Jusqu'en avril 1989 une partie d'entre eux passaient au Sénégal avec les troupeaux, mais depuis ?

Alors que les tensions dans la vallée du fleuve Sénégal étaient latentes depuis fort longtemps, la majorité des observateurs s'est trouvée surprise par la soudaineté et la violence des affrontements. Il semble pourtant que le mécontentement couvait depuis de nombreuses années et qu'il s'est aggravé lors de la mise en application de la nouvelle législation foncière.

L'abolition du droit coutumier a en effet privé les populations noires des deux côtés du fleuve d'une partie de leurs terres traditionnelles de cultures et de parcours au profit des Beydanes. L'aspect économique du conflit d'avril 1989, tout du moins avec le recul, ne peut plus échapper aux observateurs. La mise en service des barrages de Diama et Manantali devait apporter la prospérité économique dans la vallée du fleuve et les pays riverains. La tentative de confiscation d'une partie de cette prospérité au profit d'un des groupes dominants de la Mauritanie n'a pour le moment réellement apporté que le contraire de ce que les experts en attendaient.

L'étude des sociétés, de leurs relations et de leurs activités doit permettre, malgré ce contre-exemple, de prévoir sinon de désamorcer ce type de conflit. Il ne sert à rien de mettre sur pied des diagnostics du milieu puis des propositions de réhabilitation si par ailleurs on ignore ou on refuse de voir la poudrière qui s'installe, voire si l'on contribue à l'installer. Il n'est pas inutile de s'interroger sur l'impact des actions de recherche développement que ce soit sur le milieu physique ou sur les populations, même si ce n'est pas directement le sujet de cette recherche.

Après avoir décrit le milieu humain et évoqué le problème des retombées sociales faisant suite à certaines opérations de développement, nous allons aborder le milieu physique par le biais du climat en raison de son importance pour la vie des Sahéliens et aussi de son influence sur le déroulement de l'inventaire.

¹JAMIN 1986a p.25

2. LE CLIMAT

En fonction des préoccupations d'inventaire que l'on peut avoir, il existe des périodes plus ou moins favorables pour effectuer les enquêtes de terrain et les prises de vue satellitaire. Les enquêtes de terrain et les prises de vue doivent permettre d'appréhender le milieu dans sa plus grande diversité. Dans notre cas l'investigation principale porte sur la végétation, spontanée ou cultivée, ou au contraire sur l'absence de végétation, il nous faut effectuer les modalités d'inventaire une fois que le potentiel végétal est à son maximum. Il existe donc une ou plusieurs périodes favorables pour aller sur le terrain et réaliser les enregistrements satellitaires. L'analyse, même sommaire, du climat améliore le choix de ces périodes.

Donc après un rapide tour d'horizon des différents paramètres climatiques caractérisants les zones d'études, nous évaluerons à partir des enregistrements pluviométriques quelles sont les dates optimales pour effectuer l'enquête de terrain et les prises de vue satellitaire.

2.1. UNE INCONTESTABLE PÉJORATION

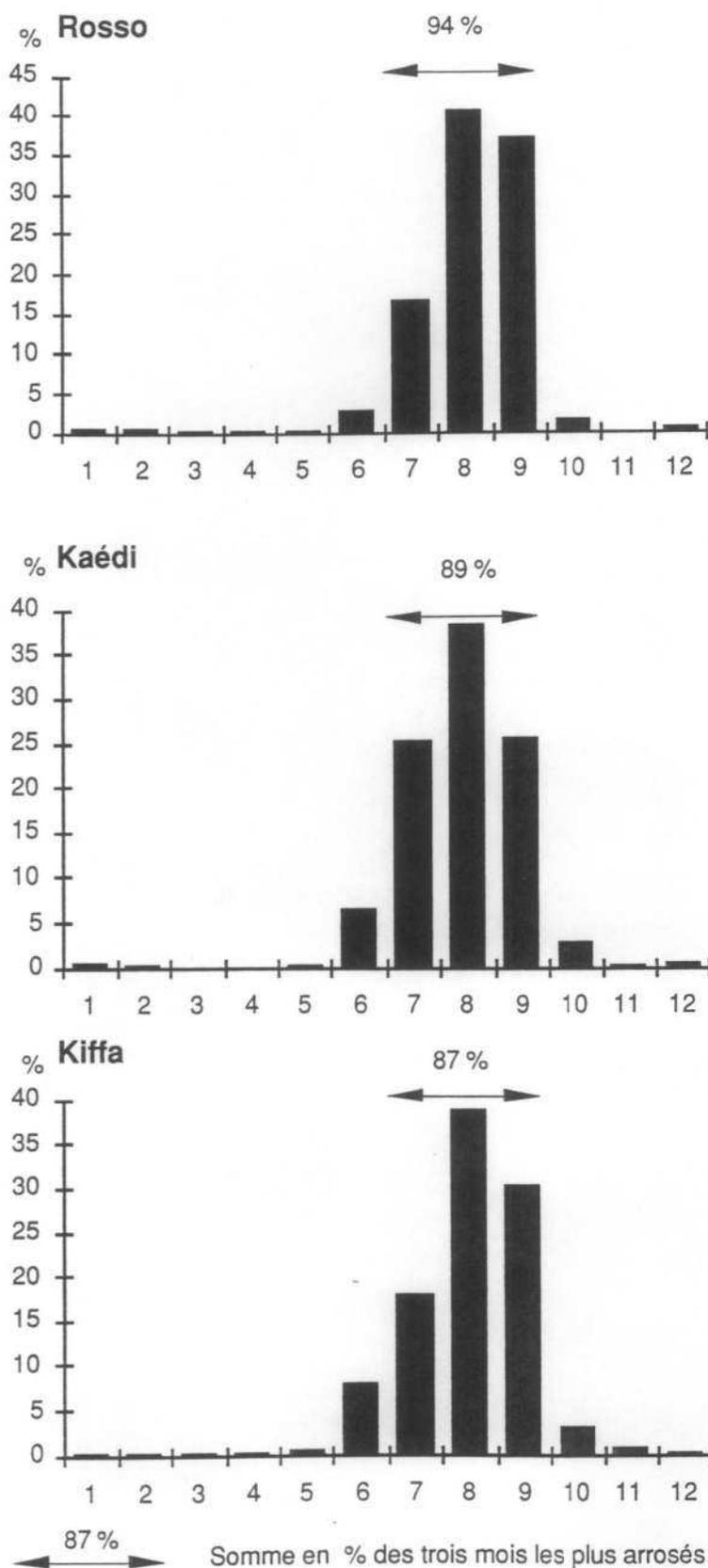
L'appellation zone tropicale recouvre des domaines très divers. Pour notre part, le champ d'expérimentation est représentatif du domaine sahélien comme le définit M. Leroux¹. Schématiquement, les précipitations sont comprises entre 100 et 5-600 mm par an, l'été est chaud et affecté d'une évaporation forte tandis que la période hivernale est fraîche ; les maxima de température interviennent aux périodes intermédiaires. Le domaine aérologique est également partagé durant l'année entre l'Harmattan en hiver et la mousson en été.

Avant de décrire plus en détail les particularités climatiques de nos zones d'expérimentation, il convient de préciser que la terminologie utilisée est celle du dictionnaire de la géographie de P. George² et que les données climatiques utilisées dans ce chapitre proviennent pour les données les plus récentes, en général depuis 1982, des services de la météorologie nationale ou de l'AGRHYMET (programme d'AGRo-HYdro-METéorologie) de Nouakchott qui centralisent les données météorologiques et climatiques de la Mauritanie pour le compte du CILSS (Centre Inter-états de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel). Avant 1982, les données, essentiellement pluviométriques, ont été gracieusement fournies par le laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM de Montpellier.

¹ LEROUX 1983 p.578

² GEORGE 1984

figure 2.1 - Fréquence mensuelle des précipitations (1940-89)



2.1.1. Un climat marqué par l'alternance saisonnière

Un des traits dominants du climat sahélien est l'alternance d'une longue saison sèche (8 à 10 mois), de septembre-octobre à mai-juin suivant les années, suivie d'une courte saison des pluies (2 à 4 mois), avec un net maximum sur août. Ce mois regroupe en moyenne 40,4 p.100 des précipitations à Rosso, 38,3 p.100 à Kaédi et 38,8 p.100 à Kiffa (cf. fig. 2.1). On verra plus loin les particularismes des trois secteurs en fonction de certains paramètres (cf. 2.2.).

De même, la saison des pluies se joue sur juillet, août et septembre. Ces mois concentrent plus de 85 p.100 du volume de précipitations annuelles : 94 p.100 à Rosso, 89 p.100 à Kaédi et 87 p.100 à Kiffa. Tous les tableaux concernant les pluviosités sont regroupés en Annexe 3.

A l'intérieur de cette opposition entre "été" et "hiver", il faut ajouter deux saisons de transition. On peut donc schématiquement décrire quatre saisons pour caractériser le domaine sahélien, nous en prendrons pour exemple les paramètres de nos trois stations.

tableau 2.1 - Températures minimales et maximales (moyennes mensuelles)

mois	j	f	m	a	m	j	j	a	s	o	n	d	Moy. an.
Rosso													
min	15,3	17,8	18,8	20,1	21,6	23,3	24,3	25,0	25,1	24,0	20,0	17,0	21,0
Max	30,9	34,3	36,3	39,3	40,3	39,7	37,4	35,8	34,1	39,0	36,4	32,0	36,3
Kaédi													
min	17,7	21,0	22,8	26,1	28,7	28,0	26,7	25,9	25,6	26,1	22,6	19,3	24,2
Max	30,6	33,9	39,0	40,2	42,0	40,4	36,7	35,5	35,2	38,3	34,5	31,3	36,5
Kiffa													
min	15,1	18,8	20,6	24,7	29,2	29,9	28,5	26,3	26,5	25,6	20,5	16,5	23,5
Max	29,5	33,6	35,9	40,2	42,8	42,0	38,3	36,4	37,1	39,0	35,3	30,4	36,7

Températures en °C

Sources : météorologie nationale

De novembre à mars s'installe une saison fraîche et sèche. Les températures moyennes minima sont atteintes en janvier avec 15 °C et les maxima en mars avec 39 °C (cf. tab. 2.1), la moyenne s'établissant entre 22 et 28 °C sur la période et pour les trois zones. Les températures sont croissantes de l'ouest vers l'est et du sud vers le nord. L'humidité relative moyenne est décroissante de l'ouest vers l'est et au fur et à mesure que la saison avance. Elle passe de plus de 60 p.100 à Rosso en novembre à moins de 10 p.100 à Kiffa en mars (cf. tab. 2.2). C'est la période des vents de secteurs N à E, les alizés continentaux, encore appelés Harmattan ou Irifi.

tableau 2.2 - Humidité relative minimale et maximale (moyennes mensuelles)

mois	j	f	m	a	m	j	j	a	s	o	n	d	Moy. an.
Rosso													
min	13,4	16,0	14,0	14,0	17,4	25,8	41,8	48,6	47,2	26,0	19,4	16,4	25,0
Max	49,6	58,4	59,8	68,2	74,2	81,4	88,8	92,2	91,2	70,2	65,4	54,0	71,1
Kaédi													
min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kiffa													
min	12,8	11,2	9,2	7,6	10,0	14,8	29,0	37,2	33,4	18,6	14,6	13,6	17,7
Max	32,6	29,8	27,4	22,6	27,2	47,8	66,2	78,8	78,4	51,0	36,2	34,4	44,4

Humidité relative en p.100

Sources : météorologie nationale

- : données manquantes ou peux fiables

Ces vents sont souvent associés à des voiles de poussière, les "vents de sable", qui interdisent une utilisation satisfaisante de l'imagerie satellitaire à certains moments de cette période. De même, l'influence de l'air boréal sur le Sahel, tout au long de la saison fraîche, occasionne parfois quelques faibles pluies. Il est nécessaire de tenir compte de la nébulosité qui leur est associée.

Puis vient une saison chaude et sèche de mars à juin, où les maxima moyens sont atteints en mai avec presque 43 °C. L'humidité relative moyenne remonte par l'ouest à la fin de la période, avec l'arrivé des vents d'ouest qui sont passés au-dessus de l'océan. Elle peut être comprise entre un peu plus de 80 p.100 à Rosso et un peu moins de 15 p.100 à Kiffa en juin.

Une saison humide et un peu moins chaude que la précédente s'étend de juin à septembre. Sa caractéristique principale est le passage du Front Inter Tropical (FIT) matérialisé par le front de mousson. Le FIT est la surface de contact entre l'air boréal sec et l'air austral humide. La progression du FIT vers le nord est suivie de pluies de moussons souvent courtes et violentes. Bien que localement liées à des phénomènes de thermoconvection ou à des effets orographiques¹, les pluies de mousson sont majoritairement associées aux lignes de grains qui se déplacent d'est en ouest et dont l'activité est décroissante aux abords du littoral².

¹PAGNEY 1976 p.118

²LAMARCHE 1990 p.1

La montée vers le nord du FIT s'effectue en moyenne en juin pour les trois secteurs. Elle est accompagnée, comme on peut s'en douter, d'une assez forte nébulosité préjudiciable aux prises de vue satellitaires.

L'humidité relative est forte pendant cette période, de l'ouest vers l'est, elle peut varier de 90 à Rosso au mois d'août sur les bords du Sénégal à 37 p.100 dans la plaine à Kiffa. Comme le constate M. Carrière pour Kaédi¹, elle est maximale au mois d'août. En revanche, les températures connaissent un petit minima, elles sont en moyenne comprises entre 28 et 30 °C. Les vents d'ouest vont rester dominants jusqu'à la redescende du FIT vers le sud en septembre-octobre.

Enfin, une saison relativement chaude et de moins en moins humide de septembre à novembre clôt la saison des pluies. La moyenne des températures remonte vers 30-32 °C, les alizés continentaux se réinstallent de l'est vers l'ouest et les grains de pluies sont de plus en plus espacés.

En conclusion pour nos trois secteurs sahéliens, il n'y a qu'une seule saison des pluies que l'on puisse qualifier d'efficace (cf. 2.2.). C'est donc à l'issue de celle-ci, avant que le dessèchement de la végétation n'intervienne, qu'il faut sélectionner ou faire réaliser les prises de vue et effectuer la mission de terrain. Avant de déterminer, à l'aide de l'analyse des précipitations, la date optimale de prises de vue, nous allons étudier la variabilité interannuelle de celles-ci et l'influence qu'elles peuvent avoir sur le milieu.

2.1.2. Péjoration climatique

Si l'on se réfère aux cartes bioclimatiques de la région méditerranéenne, réalisées en 1962 par Bagnouls et Rinaldo² (d'après L. Emberger et H. Gaussen en fonction du nombre de jours biologiquement secs), les sites de Rosso et Lekseïba, à l'est de Kaédi (cf. localisation fig. 0.1), se situaient en climat subdésertique atténué, soit 200 à 250 jours secs par an, tandis que les sites oasiens de l'Assaba, Kouroudjel et El Fa'ïya, au sud de Kiffa, étaient déjà en climat subdésertique accentué, soit 250 à 300 jours secs par an. Or, il est probable qu'avec les épisodes arides qui se sont déroulés depuis la réalisation de ces cartes (cf. *infra*), le nombre de jours biologiquement secs se soit accru.

¹CARRIERE 1989 p.25

²BAGNOULS 1962

En effet, comme le fait remarquer Ch. Toupet¹ pour la station de Kiffa, sur la décennie qui a précédé la réalisation de ces cartes (1953-1962), il a été enregistré 619 précipitations (mesurables), alors que de 1971 à 1982, période pendant laquelle de nombreux épisodes arides se sont succédés, seuls 260 jours enregistrent une précipitation, soit 2,4 fois moins. Cet exemple n'a pas vertu de statistiques, mais il est représentatif, à des degrés divers, de nombreuses stations sahéliennes.

La plupart des études sur la péjoration climatique font presque toujours exclusivement référence aux paramètres liés à la pluviométrie. A cela, il y a au moins deux raisons. La première est liée au caractère intrinsèque des précipitations. D'une part, la végétation en est directement tributaire, d'autre part, parmi les paramètres climatiques, les précipitations ont la variabilité interannuelle la plus forte.

Ensuite, comme le fait remarquer M.F. Courel², c'est probablement le paramètre le plus accessible. En effet, sur environ 500 stations qui constituent le "réseau météorologique" du Sahel ouest africain, plus des deux tiers ne sont que des postes pluviométriques. Ces raisons justifient donc largement que l'étude de la péjoration climatique soit essentiellement axée sur cet aspect.

2.1.2.1. Contexte historique

L'opinion publique des pays développés a été marquée par l'ampleur et l'apparente nouveauté des crises climatiques dont les phases de sécheresse accentuée de 1971-73 et 1982-85 semblent être le point culminant. Pourtant, de nombreux auteurs ont retracé l'histoire du climat de l'Afrique de l'ouest en général, et de l'actuel Sahel en particulier. A leur lecture, il apparaît que l'alternance des épisodes arides et humides est un phénomène très ancien. Nous en prendrons quelques exemples.

P. Michel, en retraçant les variations du climat au quaternaire récent dans le Sahel d'Afrique occidentale, insiste sur l'ampleur des oscillations climatiques qui se sont succédées depuis environ 30 000 ans. Il constate que cette ampleur a diminué, mais que des fluctuations mineures se sont encore produites aux époques protohistorique et historiques³. Les sécheresses récentes sont d'après lui à rattacher à ce type de fluctuation.

Ch. Toupet ajoute qu'il convient de distinguer les oscillations de grande ampleur, avec leurs périodes arides [Ogolién avec un maximum à 17 000 BP (BP :

¹TOUPET 1990 p.243

²COUREL 1985 p.48

³MICHEL 1984 p.134

before present, soit 1950)] ou humides (Inchirien, maximum 33 000 BP ; Tchadien, maximum 9 500 BP) et à l'intérieur de celles-ci des fluctuations moindres, c'est-à-dire des phases arides ou humides elles aussi mais de plus courte durée¹. Il ajoute que depuis le Moyen-Age, il semble que nous soyons dans «... *une oscillation négative de 200 mm, soit un décalage des isohyètes de 200 km vers le Sud si l'on se réfère à leur emplacement actuel.*»².

Cette constatation est, entre autres, fondée sur l'abandon d'anciens campements Gangara, les ancêtres des Soninkés, qui vivaient sur les plateaux de l'Assaba et du Tagant de la culture sous pluie. Or ce type de culture ne subsiste plus qu'à l'état de trace dans les zones d'étude (cf. 3.3.), il n'est réellement important dans l'économie vivrière qu'au-delà de 400 mm de pluie, soit en 1984, à une centaine de kilomètres au sud d'une ligne Kaédi-Kankossa³ (cf. fig. 0.1).

Enfin, M.F. Courel⁴ relève dans l'introduction de sa thèse un certain nombre d'expressions paysannes et de récits de voyage qui notent jusqu'à une époque récente l'alternance de crises climatiques. Il semble qu'entre la fin du XVII^e siècle et nos jours les témoignages sélectionnés (impartialement ?) relatent une lente dégradation du climat à travers le paysage.

Il faut toutefois nuancer ce constat. Comme le note E. Bernus⁵, pour deux régions différentes, à partir des pluviomètres de St Louis du Sénégal et de Niamey, l'analyse des précipitations peut déboucher sur deux visions opposées de l'évolution du climat sahélien. Il y a régression dans le cas de St Louis, alors que pour les mêmes périodes il y a augmentation du volume des précipitations à Niamey. Il faut donc considérer les séries statistiques avec prudence et ne pas les couper de leur contexte.

Bien que conscient des limites et risques de la seule étude des pluviométries, nous allons toutefois présenter le profil des trois zones d'étude et tenter de les situer dans le contexte climatique général.

2.1.2.2. *Profil pluviométrique des trois zones d'étude*

L'ancienneté des stations météorologiques synoptiques est faible en Afrique de l'ouest. Elles ont bien souvent dans le meilleur des cas un peu plus d'une soixantaine d'années. La station de St Louis (1873) est une des rares centenaires.

¹TOUPET 1984 p.143

²TOUPET 1984 p.144

³DOLLE 1984 p.40

⁴COUREL 1985 : 1-5

⁵BERNUS 1984 p.161

Elle est donc très souvent utilisée pour l'étude de l'évolution climatique. Ch. Toupet¹ note toutefois que de 1873 à 1972, sur 100 ans, il n'y a que 85 observations en raison de lacunes liées à une épidémie de fièvre jaune, à la grande guerre, etc. Le problème des lacunes concerne, comme nous allons le voir, toutes les stations et postes pluviométriques à des degrés divers.

De plus, comme nous l'avons constaté, et comme M.F. Courel² le rappelle, la qualité des relevés est discutable. Il faut donc prendre avec précaution les paramètres climatiques qui parfois, à la suite d'une simple erreur de transcription entre l'agent chargé du relevé et le centre de collecte (erreur plusieurs fois constatée), sont assez éloignés des conditions réelles.

Bien que la péjoration climatique se mesure aussi, en ce qui concerne les précipitations, en nombre de jours de pluie, intensité et durée des averses, précipitations occultes, etc., en l'absence de renseignements fiables et suffisamment complets, les précipitations seront exclusivement étudiées sous l'angle du volume pluviométrique. Nous procédons en cela comme de nombreux auteurs travaillant sur le Sahel.

Bien que les services de la météorologie nationale mauritanienne possèdent des données pluviométriques antérieures à 1940 pour les trois stations étudiées, respectivement 1934 pour Rosso, 1919 pour Kaédi et 1922 pour Kiffa, nous avons choisi d'évaluer les précipitations qui les affectent sur une base commune de 50 ans. Nous ne nous référerons donc pas à la **normale** habituellement retenue (moyenne des précipitations sur 30 ans), c'est-à-dire 1931-1960, mais à celle couvrant la période 1941-1970 (cf. *infra*).

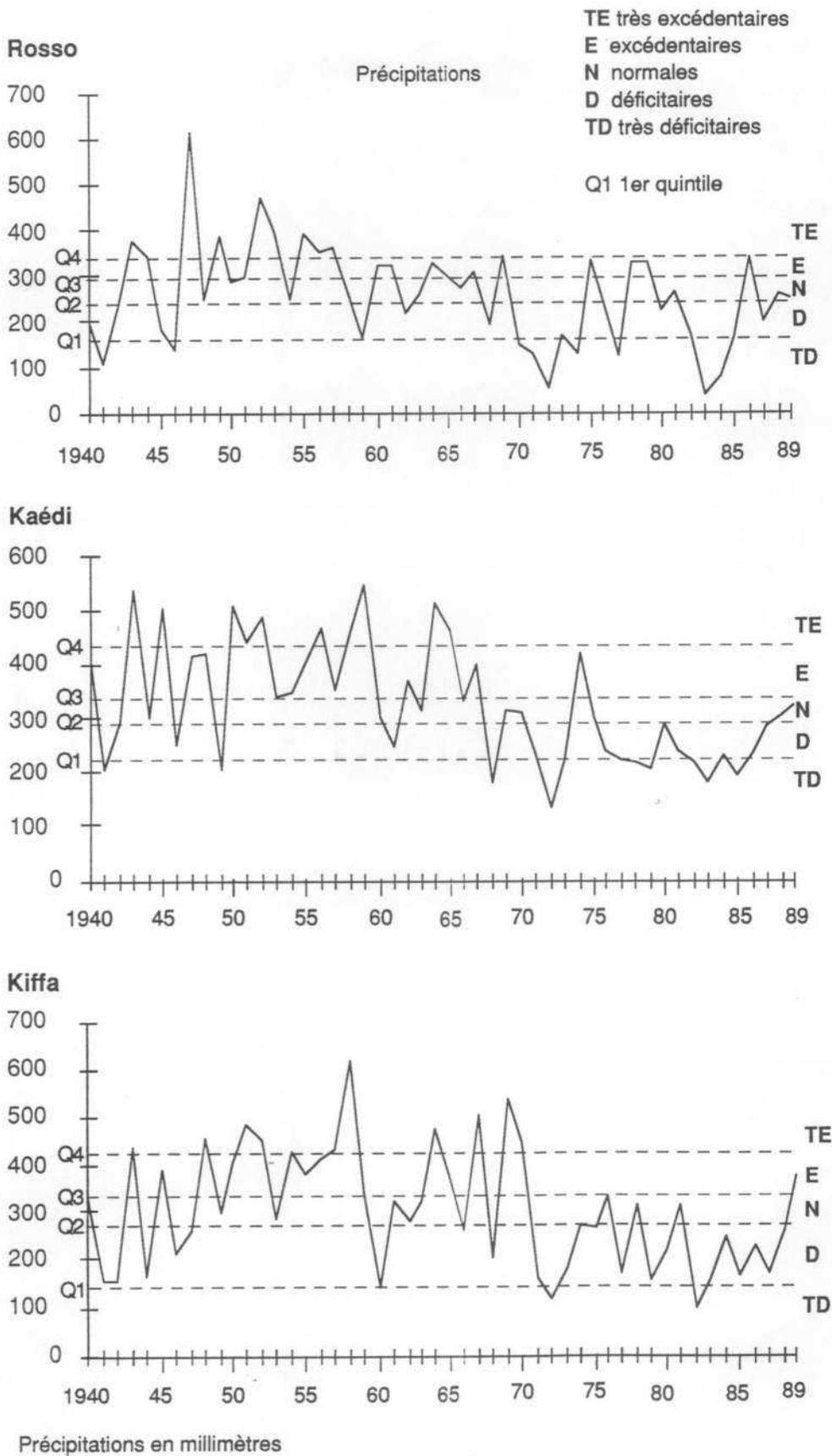
Une simple analyse visuelle de la figure 2.2 met en évidence une variabilité interannuelle que l'analyse des coefficients de variations (CV) confirme. Sur une période de 50 ans, le coefficient de variation est de 33,8 p.100 à Kaédi, 41,0 à Kiffa et 42,8 à Rosso. La station de Kaédi semble donc légèrement moins sujette à ce type d'irrégularités.

Il nous a toutefois semblé utile d'approfondir la caractérisation de ces variabilités interannuelles, mais en raison du manque de fiabilité déjà évoqué des valeurs de précipitation, il n'est pas possible de s'attacher réellement au détail de chaque année. Pour contourner ce problème, nous avons subdivisé la distribution des pluies par la méthode des quintiles, cela permet de minimiser les petites erreurs. L'ensemble de la distribution, classée par ordre croissant dans notre cas, est réparti en cinq groupes par tranche de 20 p.100, soit, pour 50 années d'observations, des groupes de 10 hauteurs d'eau annuelles.

¹TOUPET 1973 p.14

²COUREL 1985 p.48

figure 2.2 - Variations interannuelles des précipitations



Chaque groupe a reçu un qualificatif arbitraire mais évocateur. Les 20 premiers pourcents, compris entre le minimum de la distribution et Q_1 , la borne supérieure du premier quintile, sont considérés comme très déficitaires (TD, cf. fig. 2.2). Le second groupe, qui représente les 20 p.100 suivants, est compris entre Q_1 et Q_2 , la borne supérieure du deuxième quintile, il renferme les précipitations jugées déficitaires (D), etc.

Précipitations (P) :	Très Déficitaires (TD)	$\text{Minimum} \leq P < Q_1$
	Déficitaires (D)	$Q_1 \leq P < Q_2$
	Normales (N)	$Q_2 \leq P < Q_3$
	Excédentaires (E)	$Q_3 \leq P < Q_4$
	Très Excédentaires (TE)	$Q_4 \leq P \leq \text{Maximum}$

Les bornes, ou seuils, des quintiles sont regroupées dans le tableau 2.3. On remarquera que d'une station à l'autre, les seuils peuvent être très différents. Rosso, dont l'amplitude (Max. - Min.) est la plus importante, 575,2 mm, a globalement les bornes les plus basses, tandis que Kaédi a l'amplitude la plus faible, 415,0 mm, mais les seuils les plus élevés, la mousson y est plus forte et plus régulière. Kiffa occupe une position intermédiaire avec une assez forte amplitude, 520,0 mm, et des seuils qui, dans les faibles valeurs, sont proches de ceux de Rosso et se rapprochent de ceux de Kaédi dans les fortes valeurs.

tableau 2.3 - Seuils interquintiles

	Minimum	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Maximum
Rosso	36,6	163,1	241,2	292,4	337,7	611,8
Kiffa	100,3	168,7	261,8	324,7	426,3	620,3
Kaédi	130,0	219,3	290,8	333,1	429,6	545,3

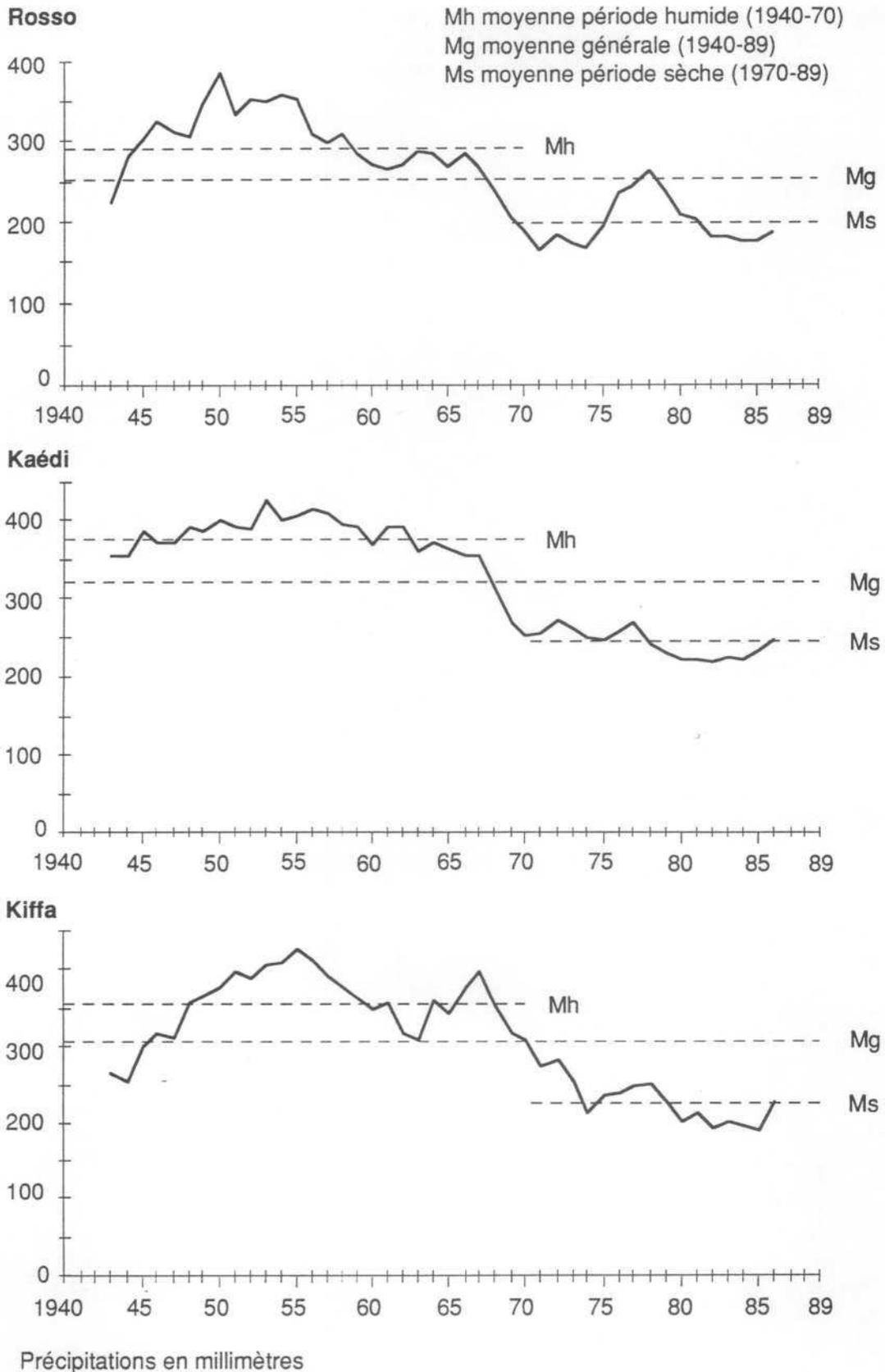
Hauteurs d'eau en mm.

Sources : voir en Annexe 3 suivant les années

On trouvera en Annexe 3 la pluviométrie mensuelle (sur 50 ans) et décadaire (sur 20 ans) des trois stations.

Cette constatation se justifie en partie par la localisation géographique des trois stations par rapport à la mousson d'été. La position de Rosso est très occidentale par rapport à la trajectoire des lignes de grains, elle est en bout de course et celle de Kiffa très septentrionale. De ce fait, Kaédi est en général la première et la plus durablement touchée par la mousson.

figure 2.3 - Diagrammes pluviométriques lissés (moyenne mobile avec un pas de 7 ans)



Rosso	16°30' N	15°49' W
Kaédi	16°08' N	13°31' W
Kiffa	16°36' N	11°24' W

L'utilisation des seuils interquintiles, qui tiennent compte du rang et non de la quantité de précipitations, permet de dégager les tendances suivantes sur les 20 dernières années (cf. fig. 2.2) :

- Rosso, depuis 1970, a bénéficié de 4 années excédentaires (précipitations annuelles supérieures à 292,4 mm) en 1975, 78, 79 et 86, mais d'aucune très excédentaire ($P > 337,7$ mm). En revanche, il y en a eu 11 déficitaires ($P < 241,2$ mm), dont 6 très déficitaires ($P < 163,1$ mm).
- Kiffa, en dehors de 1976 et 1989, n'a pas eu d'année excédentaire ($P > 324,7$ mm), en revanche elle a connu 12 années déficitaires ($P < 264,0$ mm) dont 6 très déficitaires ($P < 168,7$ mm).
- Kaédi, pour la même période, ne bénéficie que d'une année excédentaire, 1974 ($P > 333,1$ mm), pour 15 déficitaires ($P < 290,8$ mm) dont 7 très déficitaires ($P < 219,3$ mm).

Ce n'est pas tant le nombre d'années déficitaires mais plutôt leur succession qui façonne le paysage. Toujours en utilisant les seuils interquintiles, on constate pour les trois stations qu'avant 1970 il n'y a jamais eu plus de deux, voire trois, années déficitaires ou très déficitaires à la suite, alors que sur les 20 dernières années elles se sont concentrées.

Rosso connaît d'abord cinq années déficitaires de suite (1970-74), dont les trois premières sont très déficitaires, puis une rémission de sept ans où il y a toujours des années déficitaires mais isolées. Et de nouveau, quatre années déficitaires consécutives (1982-85), dont deux de suite très déficitaires. Kiffa a pratiquement connu la même situation, d'abord trois années déficitaires (1971-73), puis (1982-87). Et enfin, Kaédi connaît elle aussi trois années déficitaires (1971-73) mais ensuite **douze années déficitaires consécutives** (1976-87).

Confirmant la tendance générale, une nette aridification s'est installée sur les trois stations étudiées depuis une vingtaine d'années. Cette péjoration climatique a connu deux "pics" que l'on retrouve dans les trois cas, géographiquement peu distants il est vrai, ce sont les années de sécheresse les "mieux" connues du public, c'est-à-dire 1971-73 et 1982-85.

Du fait de la mise en évidence d'une tendance à l'aridification dans les trois stations, il nous a semblé indispensable de différencier une phase "humide" et une

phase "sèche". A la suite de G. De Wispelaere qui a obtenu des résultats très intéressants dans le Sahel du Burkina Faso¹ et du Niger², nous avons eu recours à des lissages sur les quantités annuelles de précipitations pour dégager les tendances qui pouvaient caractériser nos zones d'étude depuis cinquante ans.

Comme le conseille G. Boudet³, en citant H. Faure et J.Y. Gac, nous avons effectué un lissage de nos données pluviométriques avec un pas de sept ans (cf. fig. 2.3). Celui-ci supprime la majorité des oscillations mineures et met en évidence les tendances d'une amplitude de quelques années.

Les dates de changement de phase, passage d'une phase humide à une phase sèche et réciproquement, sont déterminées par les intersections de la moyenne générale des précipitations sur la période considérée avec la courbe lissée (cf. fig. 2.3). Dans les trois stations, la moyenne générale coupe par deux fois la courbe lissée, une première fois un peu après 1940 et une deuxième fois un peu avant 1970.

La première intersection concerne la fin de la sécheresse de 1941-42, que Ch. Toupet⁴ qualifie de «... *sévère mais de courte durée* ...». Il s'agit donc du passage d'une phase sèche à une phase humide.

La deuxième intersection caractérise le retour en phase sèche après environ 25 ans de phase humide. Elle concerne plus directement notre période d'étude. En moyenne ce changement de phase s'effectue entre 1967 et 1970. Nous avons arbitrairement retenu 1970 pour calculer sur 1941-70 une moyenne trentenaire de la phase humide et sur 1971-89 une moyenne de phase sèche. Comme on peut le constater sur la figure 2.3, elles sont beaucoup plus explicites de leur phase respective que la moyenne générale.

Les trois stations pluviométriques les plus proches de nos zones d'étude ont donc subi entre les années 1941-70 et 1971-89 (Ms/Mh) une diminution de la pluviosité de l'ordre de 30 à 40 p.100.

La "chute" des précipitations est rappelée synthétiquement dans le tableau 2.4, elle permet de mieux comprendre pourquoi le grand public a conservé en mémoire, grâce à l'image et aux médias, une telle impression de désolation.

¹DE WISPELAERE 1990 p.19

²DE WISPELAERE 1991 p.9

³BOUDET 1987b p.12

⁴TOUPET 1984 p.142

tableau 2.4 - Comparaison inter-phases du déficit pluviométrique

(en mm)	Moy. générale	Moy. humide	Moy. sèche	Ms-Mg	Ms-Mh
	Mg 1940-89	Mh 1941-70	Ms 1971-89		
Rosso	256,6	294,8	199,5	-22,3	-32,3
Kaédi	325,1	373,1	245,0	-24,6	-34,3
Kiffa	302,7	353,5	221,1	-27,0	-37,4

En conclusion, la diminution des précipitations est nette sur les trois zones d'étude retenues du Sahel sud-mauritanien. Cette "aridification" est apparue comme durable à notre échelle, malgré une légère reprise en 1988-89 (cf. Annexe 3). Notre méthodologie d'enquête doit prendre en compte cette tendance à l'aridification lors de la réalisation des inventaires car le milieu d'étude n'est pas immuable, sa diversité, son degré de dégradation évoluent et doivent être pris en compte dans un "diagnostic global" de l'environnement. Pour cela, il faut sélectionner la période optimale pour évaluer les dégradations liées à cette péjoration climatique. Cette période doit aussi bien satisfaire aux contraintes de l'enquête de terrain qu'à celles de la prise de vue. C'est ce qui va être abordé dans la prochaine section.

2.2. INFLUENCE MAJEURE DES PRÉCIPITATIONS

Les précipitations sont une contrainte majeure pour plusieurs raisons. En premier lieu, c'est une évidence qu'il convient toutefois de rappeler, la présence ou l'absence de végétation est prioritairement dépendante de la quantité des précipitations, mais aussi de leur répartition temporelle (cf. *infra*).

En fonction du volume de pluies, le cortège floristique qui s'installe peut être notoirement différent. G. De Wispelaere et B. Peyre de Fabrègues¹ ont constaté que la répartition des pluies d'une année sur l'autre (variabilité interannuelle) favorisait telle espèce plutôt que telle autre sur un même site. Alors que sur le long terme, comme de nombreux auteurs, ils constataient un «... *incontestable appauvrissement des cortèges floristiques.*»².

S'il n'est pas possible d'influer sur la quantité et la qualité de la saison des pluies, il convient toutefois d'en mesurer les effets une fois celle-ci terminée. D'une part, pour que la végétation soit au maximum de son développement lors de l'inventaire et d'autre part, pour qu'elle n'ait pas encore eu le temps de flétrir ou d'être consommée par le bétail de façon trop significative. Comme nous allons le voir, la

¹DE WISPELAERE 1988 p.12

²DE WISPELAERE 1988 p.14

période pendant laquelle les prises de vue et l'enquête de terrain sont optimales est très courte et doit donc être déterminée précisément.

Il s'agit pour le chercheur de déterminer le début et surtout la fin de la saison des pluies utiles, ou efficaces. Or bien souvent, celui-ci est loin de la zone d'étude et des paramètres climatiques qui pourraient lui permettre de déterminer la période optimale de prises de vue et d'enquête. En effet, seules les précipitations mensuelles, parfois décennales, sont facilement accessibles. Nous allons, après avoir déterminé les conditions climatiques de déclenchement et d'arrêt de la période végétative, sélectionner quelques indices qui permettent de répondre à ces questions tout en étant loin des zones d'étude.

2.2.1. Précipitations et périodes actives de végétation

Il est rare qu'en zone tropicale la température soit un facteur limitant pour la croissance des plantes. En revanche, et surtout sous les climats tropicaux secs et subdésertiques, la longue saison sèche contraint la végétation à une période active très localisée dans le temps. Pour déterminer cette période active de nombreuses méthodes sont proposées. G. Boudet dans le manuel des pâturages¹ en décrit les principales. Toutes tentent de dresser un **bilan hydrique** plus ou moins théorique et régional.

Le bilan hydrique réel est difficilement accessible car l'évapotranspiration des végétaux et les caractéristiques hydriques des sols sont rarement connues en dehors des stations de recherche agronomique. On se contente donc pour cette raison d'un bilan hydrique théorique où seules la pluviosité et l'évapotranspiration potentielle sont prises en compte. Ces deux paramètres sont portés sur un graphique, le **diagramme du bilan hydrique**, où l'on considère que la période de végétation active correspond à la période pendant laquelle la pluviosité est supérieure à la moitié de l'évapotranspiration potentielle.

Or comme le fait remarquer G. Boudet, l'évapotranspiration potentielle est déterminée par la formule de Penman dans laquelle interviennent des mesures comme l'albedo, la durée d'insolation, l'humidité de l'air, la vitesse du vent, etc. En dehors de stations bien précises, ces paramètres ne sont pas connus.

Lorsque l'évapotranspiration potentielle ne peut être calculée pour déterminer la période de végétation active, il est possible de recourir aux **diagrammes ombrothermiques** mis au point par F. Bagnouls et H. Gaussen en 1953, ou aux **abaques hydrothermiques** conçues par G. Euverte en 1967. Dans les deux cas les précipitations sont associées aux températures, en général avec un pas mensuel.

¹BOUDET 1984 : 23-25

Des diagrammes ombrothermiques, G. Boudet indique, qu'en dehors des climats équatoriaux, ils surévaluent la période de végétation active en considérant qu'un mois est humide lorsque les précipitations (en mm) sont supérieures à deux fois la température (en °C). Dans notre cas, la zone sahélienne, seules les abaques hydrothermiques semblent adaptées.

Elles partent du principe que les besoins en eau de la plante suivent une progression exponentielle telle que les besoins en eau doublent à chaque fois que la température mensuelle augmente de six degrés centigrades. En reportant les pluies mensuelles selon une échelle logarithmique et les températures selon une échelle arithmétique, il est possible de déterminer sur le graphique la période où la courbe de pluviosité est supérieure à la courbe des températures moins six degrés, l'équivalent de la moitié de l'évapotranspiration potentielle (cf. *supra*).

L'inconvénient d'une étude à partir des paramètres climatiques mensuels tient au fait qu'il est évidemment difficile de descendre à une précision de l'ordre de la décade. Or, s'il n'est pas indispensable de suivre les précipitations quotidiennement en raison de la résistance des plantules des espèces sahéliennes, il semble toutefois d'après F. Forest¹ que le pas d'étude décadaire soit le pas optimal.

L'installation de la végétation (germination et survie des plantules) survient, suivant les auteurs, dès que les précipitations décadales sont comprises entre 10 et 20 mm. Les études réalisées à Kaédi par l'IEMVT² ont retenu le seuil de 20 mm ; nous avons arbitrairement retenu le même. **La première et la dernière décades de la saison des pluies recevant une précipitation totale d'au moins 20 mm serviront à encadrer la saison des pluies efficaces.**

Comment déterminer cette saison des pluies efficaces et par extension les dates optimales de prises de vue et de missions ?

2.2.2. Période optimale d'inventaire et analyse de la pluviométrie

Comme cela a déjà été souligné, il est très difficile de se procurer, même dans le pays concerné, des données climatiques complètes et à jour. Pour notre part, à titre d'exemple, les données pluviométriques reproduites en Annexe 3 sont un "panaché" des données collectées par l'ORSTOM, l'AGRHYMET et la météorologie nationale de Nouakchott.

¹FOREST 1974 p.15

²BOUDET 1987a p.25

Pour le chercheur qui ne peut se rendre sur place avant sa mission effective et ne peut donc avoir connaissance des données pluviométriques récentes dans son laboratoire, il existe, avec une interruption entre 1987 et 1991, un bulletin décadaire publié par l'AGRHYMET où un bilan météorologique assez complet de la campagne agricole était dressé. Ce bulletin ne paraît que de juin à octobre, mais il comporte les précipitations décadaires de pratiquement toutes les stations pluviométriques des pays du CILSS. Il permet donc la "prédiction" des dates optimales d'inventaire (cf. *infra*) moyennant un abonnement de quelques années et la consultation des archives du laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM à Montpellier pour avoir des données sur une vingtaine d'années. La programmation de l'inventaire peut donc se faire assez simplement.

Nous avons à la précédente section déterminé deux périodes distinctes quant aux phases climatiques qui se sont succédées sur le Sahel mauritanien. La détermination de la date optimale d'inventaire doit donc plus particulièrement faire référence à la phase aride actuelle. Celle-ci a démarré il y a une vingtaine d'années (cf. 4.1.2.2.). Nous allons de ce fait utiliser les données pluviométriques relevées entre 1970 et 1989 pour appuyer notre démonstration. A-t-on suffisamment de recul ?

L. Emberger¹ *et alii* notent que dans le cas de relevés pluviométriques, une moyenne est considérée comme très bonne lorsqu'elle porte sur 25 ans et acceptable lorsqu'elle porte sur 10. Comme d'une part, nous avons les données sur 20 ans et que d'autre part nous souhaitons utiliser la méthode des quantiles, il nous a semblé opportun de travailler sur deux décennies.

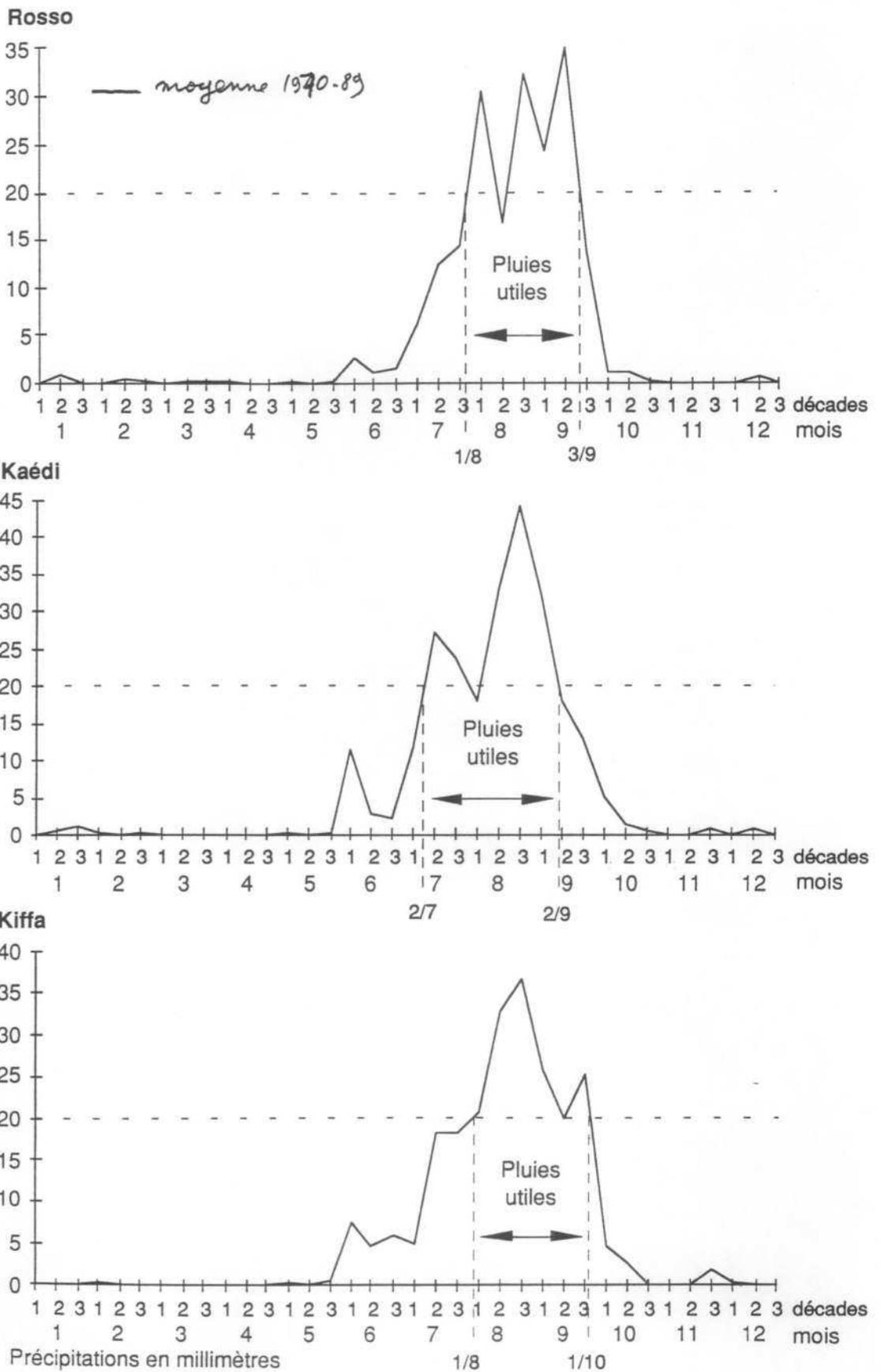
2.2.2.1. Période optimale et moyenne décadaire

La première possibilité pour déterminer l'époque optimale de prise de vue et d'enquête de terrain est de rechercher à partir des moyennes pluviométriques décadaires la période où les précipitations sont supérieures aux 20 mm requis précédemment définis (cf. 2.2.1.). Cette période peut être matérialisée graphiquement comme cela a été fait sur la figure 2.4. Elle est appelée **période des pluies utiles**, ou bien encore des pluies efficaces.

Les trois stations ont un profil moyen relativement différent mais une durée des pluies utiles assez proche. On notera que sur les graphiques les repères décadaires portés sur l'axe des abscisses matérialisent la décade écoulée.

¹EMBERGER 1963 p.20

figure 2.4 - Détermination de la période des pluies utiles



Pour Kiffa, la période des pluies utiles démarre dans la première décennie d'août et s'achève dans la première d'octobre. Elle s'étend donc en moyenne sur sept décades.

Pour Kaédi, cette période est plus précoce. Elle démarre dans la deuxième décennie de juillet, pour s'achever dans la deuxième de septembre, soit aussi une durée moyenne de sept décades.

Enfin à Rosso, elle est un peu plus brève (première décennie d'août à la troisième de septembre), soit en moyenne six décades.

On notera aussi pour les trois stations, qu'il existe un risque d'interruption, donc de stress hydrique, pendant la période végétative. Ce risque moyen est matérialisé par le "rentrant" plus ou moins marqué pendant la période des pluies utiles. Ce stress est latent ou avéré pendant la deuxième décennie d'août à Rosso, la première d'août à Kaédi et la deuxième de septembre à Kiffa.

Stress hydrique ne signifie pas forcément mort de la végétation. G. Boudet¹ *et alii* ne signalent à Kaédi sur trois années d'enquête qu'une seule période (deux décades consécutives) où le stress hydrique a détruit un premier cycle végétatif. Ils signalent toutefois que sans être léthal, celui-ci est pratiquement constant tout au long des trois périodes végétatives. Seules les espèces les plus résistantes vont à maturité dans ces conditions, avec pour conséquence un appauvrissement du cortège floristique.

En dehors de conditions très particulières d'habitat, impluvium, lit d'oued, etc. G. Boudet² note que «... s'il y a deux décades consécutives sans pluie, la pluie utile antérieure est considérée comme annulée.». Cela signifie que la plupart des espèces herbacées *annuelles* ne survivent pas à une absence de précipitation d'une vingtaine de jours. Ces deux éléments vont nous permettre d'approcher la période optimale d'inventaire.

En moyenne à Kiffa, le dernier total décadaire d'au moins 20 mm tombe sur la troisième décennie de septembre. On considère donc que 20 jours plus tard, entre le 10 et le 20 octobre, la végétation herbacée *annuelle* est desséchée, en dehors des cuvettes humides. Dès lors, la quantification de la biomasse par satellite ou au moyen d'un radiomètre de terrain (cf. 4.3.) est moins précise que sur la végétation verte³. La cartographie et les statistiques d'occupation du sol sont, elles aussi, moins performantes en raison d'une moins bonne dynamique de l'image sur les zones de végétation desséchée (cf. 8. et 9.). On aura tout intérêt à ne pas dépasser de plus

¹BOUDET 1987a : 33-34

²BOUDET 1981 p.9

³DE WISPELAERE 1988 p.28

d'une décade la date indiquée par l'intersection entre la courbe des moyennes pluviométriques et le seuil des 20 mm.

Pour la région de Kiffa, on peut donc estimer que la période optimale d'acquisition d'un enregistrement satellitaire est centrée sur la première décade d'octobre. Si l'on programme une enquête de terrain d'au moins un mois, celle-ci sera centrée sur la même décade et couvrira donc une période allant de la deuxième décade de septembre jusqu'à la deuxième décade d'octobre.

Suivant la façon dont on centrera la période d'enquête, on risque soit de commencer avant la pousse complète et il n'y a rien à faire à part revenir, soit de finir l'inventaire avec une dessiccation avancée. Dans ce cas il faut, si possible, commencer les prélèvements par les sites à faible réserve en eau et fort drainage (points hauts type dôme sableux, etc.) et finir par les sites à plus forte réserve en eau (points bas type cuvettes argileuses, etc.).

Malgré une courbe quelque peu différente pour Rosso, la dernière décade utile est la même que pour Kiffa. La période d'inventaire retenue sera donc la même.

Enfin, pour Kaédi la période optimale est plus précoce d'une semaine. La dernière décade de pluies utiles est la deuxième de septembre et donc la végétation herbacée ~~pluviale~~ est en théorie desséchée vers le 10 octobre. Pour des conditions analogues, la période optimale de prises de vue est centrée sur la troisième décade de septembre et l'inventaire va de la première décade de septembre à la première d'octobre.

Pour que ces dates de programmation soient pertinentes, il faut que la zone d'enquête ne soit pas trop éloignée de la station de référence et que d'autre part la répartition spatiale des pluies ne soit pas trop hétérogène, ce qui est loin d'être acquis.

2.2.2.2. Période optimale et pluviosité probable

L'inconvénient de la méthode qui vient d'être proposée est d'être très sensible aux fortes précipitations tardives de fin de saison des pluies. Celles-ci peuvent influencer de manière importante le calcul des précipitations moyennes. Il est de ce fait préférable de raisonner en termes de probabilité. Nous comparerons les deux approches pour déterminer si cette hypothèse se révèle exacte et plus adaptée à nos besoins.

A la suite de M. Braud¹ qui propose une analyse fréquentielle des pluviosités pour déterminer la date optimale des semis, nous avons décidé d'évaluer les possibilités de cette méthode pour déterminer la période optimale d'inventaire. Moins sophistiquée que la méthode d'analyse fréquentielle du modèle ORSTOM², cette statistique de rang permet toutefois de classer les précipitations en fonction de leur fréquence d'apparition.

Pratiquement, on a regroupé décade par décade les vingt années de précipitations de la phase aride. Ensuite, chaque décade a été classée par ordre croissant, puis la série ainsi constituée est divisée en quatre quartiles représentant chacun 25 p.100 de la distribution. Tout comme cela avait été fait pour l'étude du profil pluviométrique des trois zones (cf. 2.1.2.2.), chaque groupe a reçu un qualificatif arbitraire mais évocateur. Les 25 premiers pourcents, compris entre le minimum de la distribution et Q_1 , la borne supérieure du premier quartile, sont considérés comme très déficitaires (TD, cf. fig. 2.5). Le second groupe, qui représente les 25 p.100 suivants, est compris entre Q_1 et Q_2 , la borne supérieure du deuxième quartile, qui est aussi la médiane de la distribution, il renferme les précipitations jugées déficitaires (D), etc.

Précipitations (P) :	Très Déficitaires (TD)	$\text{Minimum} \leq P < Q_1$
	Déficitaires (D)	$Q_1 \leq P < Q_2$
	Excédentaires (E)	$Q_2 \leq P < Q_3$
	Très Excédentaires (TE)	$Q_4 \leq P \leq D_9$

Nous avons utilisé D_9 , la borne inférieure du dernier décile (10 p.100 de la distribution), à la place du maximum enregistré pour seuiller la partie supérieure de chaque décade. Cela nous a permis d'établir des profils plus représentatifs car moins tributaires de précipitations exceptionnelles, donc peu représentatives. En effet, par ce moyen sont éliminés les dix derniers pourcents des enregistrements pluviométriques. Dans notre cas, cela revient à ignorer deux enregistrements pluviométriques sur vingt.

De même, pour accroître la représentativité de nos calculs, nous n'avons pas eu recours aux quintiles mais aux quartiles. Cela nous a permis de conserver cinq enregistrements pluviométriques décadaires par classe au lieu de quatre. En contrepartie, il n'y a plus de classe "Normale" comme pour la figure 2.2, mais la valeur médiane est représentée. Elle sépare la zone des pluviométries déficitaires (D) de celle des pluviométries excédentaires (E).

¹BRAUD 1985 p.56

²BOUDET 1987a p.25

Il convient de lire ces graphiques de la façon suivante. Les quantiles sont des seuils qui ont une certaine chance d'être dépassés. Si l'on prend la troisième décade d'août de Rosso, on constate que l'on a 90 p.100 de chance de ne pas atteindre un total décadaire de 88,5 mm (position du décile supérieur D_9) et 10 p.100 de le dépasser. De même, on a autant de chance que ce total soit inférieur ou supérieur à 20,5 mm (position de la médiane notée Q_2), etc.

Enfin, lorsque l'on relie par une courbe un même quantile pour chaque période, on obtient le profil d'une certaine probabilité de pluviométrie. Cela permet de "prédire" le comportement pluviométrique d'une station pour un certain seuil de probabilité.

Dans le cas de Rosso, par exemple, le décile supérieur (D_9), le quartile supérieur (Q_3) et la médiane (Q_2) montrent qu'un triple maximum peut se produire certaines années, ou que le maximum a lieu tantôt au cours de la première décade d'août, tantôt au cours de la troisième de ce même mois, ou bien encore lors de la deuxième décade de septembre. Dans le cadre de notre problématique d'inventaire cela signifie qu'il faut éviter de prendre un enregistrement ou de procéder à l'enquête de terrain lors de la première décade de septembre, car il y a encore 50 p.100 de chance pour que le total décadaire soit de 28,5 mm la décade suivante, donc que le cycle végétatif se poursuive encore pendant une à deux décades.

L'analyse comparée des profils permet de déterminer des similitudes. Pour les trois stations, il existe un risque, relativement faible il est vrai [à peine supérieur à 10 p.100 (cf. D_9 fig. 2.5)], de stress hydrique en cas de forte pluie précoce (lors de la première décade de juin), car dans plus de 90 p.100 des cas cette forte pluie est suivie de deux décades où les totaux décadaires sont inférieurs à 20 mm. Pour Kaédi, cette forte pluie peut avoir un caractère érosif, car dans 10 p.100 des cas, le total décadaire sera supérieur à 50 mm alors que la végétation n'est pas encore installée.

Toujours pour Kaédi, le régime pluviométrique probable nous confirme un risque important de stress hydrique lors de la première décade d'août. Par cette méthode d'analyse, nous savons maintenant que cette période de stress, déjà signalée lors de l'examen de la figure 4.4, apparaît dans 75 p.100 des cas, soit trois années sur quatre.

Cette méthode est donc beaucoup plus performante que l'analyse du profil moyen qui ne peut que signaler une inflexion dans le régime pluviométrique. Elle permet aussi de constater que l'inflexion qui caractérise le profil de Rosso est pratiquement sans conséquence car dans plus de 50 p.100 des cas, lors de la première décade d'août, il n'y a pas encore eu de précipitations décadaires supérieures à 20 mm. La période des pluies utiles n'a pas encore démarré.

Ces trois graphiques mettent d'ailleurs remarquablement en évidence l'absence de période, pendant la saison des pluies, où le risque de stress hydrique est minimale à défaut d'être exclu. En effet, ce n'est qu'à partir du profil médian (Q_2), soit une année sur deux, que l'on dépasse, parfois à peine, le seuil des 20 mm noté comme indispensable au démarrage et maintien de la végétation (cf. 2.2.1.) et ce sur plusieurs décades.

A Kiffa, la période des pluies utiles, 50 p.100 de chance de dépasser les 20 mm, va du milieu de la deuxième décade d'août à la fin de la première de septembre, soit deux décades et demie. Pour Kaédi, cela va de la fin de la troisième décade de juillet au milieu de la deuxième de septembre, soit quatre décades et demie avec, comme nous l'avons précédemment souligné, plus de 50 p.100 de chance pour qu'un stress hydrique d'une à deux décades se produise début août. Enfin pour Rosso, il n'y a pratiquement qu'une seule décade qui remplisse les conditions requises, la deuxième de septembre.

Quand doit-on programmer les prises de vue satellitaires et aller sur le terrain ? Ici aussi, il convient de raisonner en termes de probabilité. Dans le cas de la prise de vue, la procédure la plus prudente est de se référer au profil médian et de repérer la période où il repasse sous le seuil des 20 mm. On retient alors cette date comme date de début d'enregistrement.

Si l'année est déficitaire ou très déficitaire, la date de prise de vue déterminée par le profil médian sera un peu tardive sur une végétation peu importante. Les classifications seront certainement difficiles et peu satisfaisantes pour l'aspect évaluation des ressources pastorales en raison de l'influence de la composante sol dans les radiométries.

Si l'année est "normale", c'est-à-dire proche du comportement médian, environ une décade après que l'on a repéré l'intersection du profil médian descendant avec le seuil des 20 mm, la végétation sera à son maximum. C'est donc la période la plus favorable.

Cependant, le graphique indique qu'il existe encore un risque de pluie non négligeable, en probabilité plus qu'en volume (surtout si la pente des quantiles est faible), et donc de nuages. Rappelons que ce paramètre perturbe l'enregistrement dans la plupart des longueurs d'ondes usuelles (visible et proche infrarouge). On prendra donc soin de ne prendre que des images qui comportent moins de 10 p.100 de nuages.

Lorsqu'il s'agit d'une programmation, SPOT Image s'engage à réitérer les enregistrements jusqu'à obtention d'une image satisfaisante, à l'intérieur de la période préalablement retenue. En conséquence, pour obtenir une image utilisable dans sa totalité, la date de prise de vue risque d'être de moins en moins favorable si la saison des pluies traîne en longueur (dessiccation de plus en plus avancée).

Enfin, pour prévenir une nébulosité trop durable, comme cela vient d'être évoqué, ou dans le cas d'années excédentaires ou très excédentaires, il faut prévoir que la période d'enregistrement puisse s'étendre au moins jusqu'à ce que le décile supérieur (D_9) coupe le seuil des 20 mm. Cette date marquera la fin de la période d'enregistrement minimale. Comme à cette date, la présence d'une couverture nuageuse n'est pas exclue, surtout lors des années excédentaires, il est à notre avis préférable de prendre comme date butoir le moment où D_9 coupe l'axe des abscisses.

Quel que soit le cas de figure, on retiendra une période d'enregistrement allant de l'intersection du profil médian avec le seuil des 20 mm à l'intersection du profil du décile supérieur (D_9) avec l'axe des abscisses.

Il n'est toutefois pas exclu que des périodes suffisamment dégagées, entre les passages de grains, permettent une prise de vue. Le différentiel de production que l'on peut en attendre risque d'être négligeable en regard des quantités pluviométriques encore probables. Pour nos trois stations sahéliennes (cf. fig. 2.5), ces quantités sont largement en deçà des 20 mm requis. Le seul risque lié à un enregistrement entre les grains vient de la subsistance de zones encore humides, due à la précédente averse, à côté de secteurs déjà secs ou restés secs ; cela complique les traitements (cf. 4.3.).

Quant à l'enquête de terrain proprement dite, il n'est plus nécessaire de la "centrer" sur la décade optimale comme nous l'avions fait lors de l'analyse par les pluviométries moyennes. En effet, l'analyse des pluviométries probables démontre que la période optimale est suffisamment étendue pour que l'on puisse faire coïncider l'enquête de terrain avec la programmation satellitaire, lorsque celle-ci a lieu. Elle sera donc le reflet exact des conditions enregistrées par le satellite, conditions favorables aux différentes mesures à effectuer (biomasse, humidité du sol, etc.). Il faut cependant noter que ce n'est pas la plus favorable pour les conditions d'enquête, de nombreux marigots sont encore en eau, c'est le début de la petite saison chaude, etc.

En fonction des conditions sus-mentionnées, la période optimale d'inventaire pour Kiffa va de la première décade de septembre à la première de novembre. On notera, toutefois, qu'après la première décade d'octobre le risque de pluie est très faible, donc celui de dessiccation très fort. Pour Kaédi, cette période va du milieu de la deuxième décade de septembre à la première de novembre, avec toutefois un risque très faible à partir de la deuxième décade d'octobre. Enfin pour Rosso, elle va du milieu de la troisième décade de septembre à la troisième d'octobre, avec aussi un risque très faible de précipitations à partir de la première d'octobre. **On aura donc tout intérêt à avoir terminé les enquêtes de terrain et les prises de vues pour la mi-octobre, et ce quelles que soient les zones de l'étude.**

Globalement, la période optimale commence d'abord par la station la plus orientale, Kiffa, puis Kaédi et enfin la plus occidentale Rosso. Cette dernière a aussi la période la plus brève avec deux à quatre décades optimales d'inventaire alors que les deux autres stations ont entre quatre et huit décades.

La question qui vient tout de suite à l'esprit est : «par quelle zone d'étude doit-on commencer ?». Aucune des méthodes testées n'apporte de réponse dans la mesure où les périodes d'enquête se chevauchent. Sur de grandes zones d'étude, avec des durées d'enquête de l'ordre du mois, il faut envisager plusieurs équipes, avec les coûts et les lourdeurs en conséquence. Sur de petites zones tests, avec peu de quantification et donc de temps d'enquête, il est possible d'enchaîner les trois secteurs du plus oriental au plus occidental ou de celui qui a la période optimale la plus brève à celui qui a la plus longue.

Ces résultats, bien que proches de ceux établis avec les pluviométries moyennes (cf. 2.2.2.1.), permettent une approche beaucoup plus nuancée de la saison des pluies. **Il est donc préférable de recourir à l'analyse de la pluviométrie probable pour déterminer la période optimale d'inventaire.**

2.2.2.3. *Autres méthodes*

Dans la mesure où l'on recherche d'une part la période des pluies efficaces, pour déterminer à partir de quels moments la végétation aura atteint le maximum de sa croissance, et d'autre part la période à faible nébulosité qui suit directement l'optimum de végétation, il peut être intéressant de coupler l'analyse des pluviosités probables à celle du nombre de jours de pluie par décade ainsi qu'à celle de la couverture nuageuse. Bien que ces méthodes soient théoriquement très satisfaisantes, le manque de données ne nous a pas permis de les tester sur nos zones d'étude. Elles ne seront évoquées que dans la mesure où elles sont susceptibles d'apporter un complément à ce que nous avons développé.

Ni l'analyse du nombre de jours de pluie, ni celle de la fréquence de la couverture nuageuse ne permettent de déterminer la période des pluies utiles à la végétation. Ces deux analyses ne peuvent venir qu'en complément de l'étude des pluies probables. En revanche, elles offrent une meilleure détermination de la persistance nuageuse au-dessus des stations d'enregistrement, voire des zones d'étude. En effet, la présence des nuages n'induit pas forcément une pluie quantifiable que l'on retrouvera dans le total décadaire, alors qu'ils perturbent considérablement les prises de vue.

En raison des relevés de précipitations incomplets (la diversité des sources y est pour beaucoup), il n'a pas été possible d'étudier la fréquence des jours de pluie et

par extension celle des nuages, sur les 20 dernières années. Nous pensons toutefois, sous toutes réserves, que ces relevés sont accessibles auprès de la station AGRHYMET de Niamey. Étudiés par décade comme les pluviosités probables, ils devraient permettre de calculer la probabilité de prises de vue ou tout du moins d'affiner la sélection de la période optimale.

L'analyse de l'occurrence nuageuse, comme l'ont pratiquée F. Dureau¹ *et alii*, est encore plus précise, elle nécessite toutefois de connaître la fréquence nuageuse, décadaire dans notre cas, à l'heure du passage du satellite. Cette éventualité est moins fréquente, car il faut dépendre d'une station synoptique qui enregistre ce paramètre, et pas d'un simple poste pluviométrique. Lorsque c'est le cas, l'analyse de la présence nuageuse est encore plus intéressante que celle du nombre de jours de pluie, car elle prend en compte les jours couverts où il ne pleut pas.

Lorsque l'on possède les données journalières, il est de même possible d'éliminer du catalogue des images disponibles, les enregistrements parasités par une brume sèche due, par exemple, aux vents de sables. De même, l'analyse du paramètre nuage est plus significative, quant à la superficie couverte, que celle des précipitations plus ponctuelles et plus hétérogènes. La qualité du relevé au niveau de la station prend ici toute son importance.

En conclusion, bien qu'une connaissance approfondie du climat sahélien ne soit pas nécessaire, il apparaît clairement que l'analyse de certains paramètres permette de mieux sélectionner les dates optimales d'inventaire. Dans le Sahel mauritanien, l'analyse des pluies probables décadaires s'est avérée la plus performante pour limiter l'influence de la variabilité interannuelle des précipitations.

Cette méthode, outre qu'elle facilite la détermination de la période optimale d'inventaire, permet d'apprécier aisément celle des pluies utiles et celle où les risques d'érosion les plus forts sont les plus probables. Le choix de la période optimale d'acquisition des enregistrements satellitaires serait probablement fiabilisé par l'étude conjointe du nombre de jours de pluie par décade, voire de la nébulosité, mais ces données ne sont pas accessibles en tous lieux.

L'utilisation conjointe de la télédétection et de l'enquête de terrain lors des inventaires d'occupation du sol est bien adaptée, d'un point de vue climatique, au Sahel. La brièveté de la saison des pluies, et donc celle de la présence des nuages, est un atout pour se déplacer et pour utiliser l'imagerie satellitaire. En revanche, cette brièveté apparaît comme un handicap pour le développement de la végétation et de l'activité humaine. C'est ce que nous allons voir dans le prochain chapitre.

¹DUREAU 1989 fiche 3

3. LE MODELÉ ET LA VÉGÉTATION

Alors qu'en regard de la problématique d'inventaire, l'enquête de terrain et la télédétection s'accommodent très bien du climat sahélien des zones étudiées, qu'en est-il du modelé de ces régions et du type de végétation qui y croît ?

Pour répondre à cette question, nous avons choisi de réaliser une description synthétique du milieu physique dont le fil directeur serait la "pénétrabilité" et les potentialités du milieu. La pénétrabilité conditionne l'accessibilité aux unités d'enquête. Elle est fonction du substrat, du modelé et de l'hydrologie de surface. Les potentialités du milieu conditionnent de manière significative l'intérêt de la région, il s'agit de la végétation spontanée, encore appelée naturelle, et des cultures.

3.1. DES PAYSAGES CONTRASTÉS

D'après J. Nougier¹, la structure géologique de la Mauritanie comprend quatre ensembles qu'il est possible de décrire schématiquement comme suit. Au nord, un socle cristallin précambrien constitue la dorsale Regueibat (cf. fig. 3.1). A l'est se situe un bassin paléozoïque, le bassin de Taoudéni. Il est séparé des deux bassins superposés du Cénozoïque, les bassins sénégal-mauritaniens, par les plissements de la chaîne hercynienne des Mauritanides orientées nord-sud et qui bordent à l'ouest le Craton ouest-africain², c'est-à-dire le socle précambrien précédemment cité.

Les trois secteurs d'étude se répartissent sur plusieurs ensembles. Le secteur de Rosso et la partie ouest de Lekseïba sont rattachés aux bassins sénégal-mauritaniens, alors que la partie est appartient à l'extrême-ouest de la chaîne des Mauritanides. Enfin, le secteur des palmeraies de Kouroudjel et El Fa'iya, au sud de Kiffa, est rattaché au bassin de Taoudéni. Cette diversité d'appartenance ne se traduit pas, d'un site à l'autre, par des reliefs très différenciés ni très marqués. L'altitude moyenne est inférieure à 50 m pour Rosso et Lekseïba et à 100 m pour le secteur des palmeraies. Cependant, chaque zone d'étude a ses caractéristiques physiques propres. Dans la mesure où celles-ci influent sur l'inventaire, elles vont être détaillées secteur par secteur.

Il nous apparaît important d'introduire ici une précision quant à la définition de ce que nous qualifions de zone d'étude. La zone d'étude représente de manière extensive le milieu sur lequel porte l'enquête. C'est le cas pour la description climatique. En effet, aucune des stations météorologiques n'est située à l'intérieur du

¹NOUGIER 1977 p.8

²TOUPET 1977 p.25

périmètre d'enquête, pourtant leur proximité géographique et surtout climatique permet d'utiliser leurs paramètres pour décrire ces secteurs.

figure 3.1 - Les grands ensembles géologiques de la Mauritanie



sources : d'après J. Nougier 1977 p.9

En revanche, lorsque la description et l'analyse vont porter exclusivement sur les zones réellement enquêtées, c'est le cas pour la végétation, le substrat, etc., nous introduirons le vocable de **zone pilote** pour faire référence aux domaines où les méthodes d'inventaire ont effectivement été testées. Cette notion vient donc en complément de celle de zone ou secteur d'étude avec un référent géographique plus restreint. C'est à partir de ces paragraphes qu'il nous a semblé possible de l'utiliser.

3.1.1. La zone pilote de Rosso

Si l'on se réfère à la carte géologique du Sénégal à 1/200 000, feuille de Dagana, dressée par le BRGM et publiée avec la thèse de P. Michel¹, le secteur de Rosso est essentiellement quaternaire en ce qui concerne ses affleurements. En effet, le diéris est dans son ensemble caractérisé par une couverture de dunes rouges de

¹MICHEL 1973

l'Ogolien, alors que le wallo est constitué de quelques terrasses marines sableuses du Nouakchottien, de hautes levées fluvio-deltaïques du post-Nouakchottien et enfin de dépôts actuels ou sub-actuels sous forme d'une part de cuvettes argileuses de décantation et d'autre part de levées.

La couverture sableuse du diéri repose sur une sédimentation post-éocène dite du Continental terminal qui n'est affleurante qu'à l'est de Boghé¹, donc hors de la zone pilote. Nous en reparlerons lors de la description de celle de Lekseïba. Les dépôts quaternaires du wallo reposent quant à eux sur les séries de l'Éocène ou de la base du Continental terminal².

Les seuls problèmes de pénétrabilité dus au relief, que nous ayons rencontrés, sont liés à la couverture sableuse. Celle-ci est constituée d'une juxtaposition de petits alignements dunaires (actuellement fixés) issus du remaniement des grands cordons dunaires ogoliens³, datés de la petite phase sèche (située entre - 8 000 et - 6 000 ans BP). Ils sont orientés NNE-SSW, alors que les cordons ogoliens sont plus NE-SW. La dénivellation des petits alignements n'excède pas une dizaine de mètres pour des pentes assez faibles, seules quelques crêtes posent un problème de franchissement aux véhicules tout terrain. Le contournement des petits alignements est envisageable dans la mesure où leur longueur est en moyenne de deux kilomètres. En revanche, celui des cordons ogoliens est plus problématique car ces dunes longitudinales font parfois plusieurs dizaines de kilomètres. Et bien que de forme émoussée, elles peuvent encore atteindre un dénivelé de 30 mètres avec des pentes souvent comprises entre 5 et 10 degrés⁴ dans un sable plus ou moins mou selon l'heure de la journée.

La contrainte hydrographique est plus en mesure, dans ce secteur, de compliquer la progression de l'inventaire (cf. fig. A.8.1). En effet, bien que la zone pilote soit au nord du fleuve Sénégal, le wallo est occupé par de nombreuses dépressions dont l'inondation est durable. De surcroît, elle est située entre le fleuve et le lac de Rkiz. Lors des crues du fleuve, d'août à novembre, de nombreuses interdunes se retrouvent plus ou moins inondées, bien que ces diverticules n'atteignent pas le lac. Son alimentation se fait par des interdunes situées plus à l'est.

En dehors de cela, il n'existe aucun autre écoulement de surface, même temporaire. La région n'est pas "sèche" pour autant car de nombreux puits sont présents dans la zone. Ils sont alimentés essentiellement par la nappe du Trarza et

¹MICHEL 1973 p.85

²MICHEL 1973 p.430

³MICHEL 1973 p.550

⁴MICHEL 1973 p.498

l'aquifère alluvial du Sénégal. Lors de nos approvisionnement en eau, nous n'avons pas constaté une trop forte salinité de celle-ci. La construction du barrage de Diama, vers l'embouchure du fleuve, en est certainement la cause, car elle limite les remontées d'eaux saumâtres en période d'étiage. Il est probable que si l'on refaisait actuellement les mêmes mesures de salinité que celles réalisées par K. Dalsted¹ en 1982, les résultats obtenus seraient inférieurs aux 2 g/l qu'il avait trouvés à l'époque.

En conclusion, la zone pilote de Rosso ne pose pas de problèmes de pénétrabilité en ce qui concerne son modelé. Les problèmes rencontrés sont plus liés à la durée de la période d'inondation, période qui s'étend de la saison des pluies jusqu'au mois de novembre pour les petites dépressions. Certains diverticules du Sénégal restent en eau au moins jusqu'au mois de mars, le Tambass par exemple. Ils imposent parfois de longs détours pour rallier les segments d'enquête. Cet aspect n'est pas négligeable dans la prévision du temps d'enquête, mais d'une manière générale, notre méthode d'inventaire reste tout à fait adaptée à ce type de terrain, dans la mesure où l'on enquête les segments par groupe.

3.1.2. La zone pilote de Lekseïba

Bien qu'appartenant pour partie au même ensemble géologique que le site de Rosso, le secteur de Lekseïba est très différent. Les dépôts du Tertiaire sont ici affleurants. La carte géologique de la RIM, feuille de Kaédi, nous les montre encadrant, au nord et au sud, les dépôts actuels et sub-actuels du lit du Gorgol. Il s'agit de couches sédimentaires qui se sont formées pendant l'Éocène moyen (Lutétien) alors que l'océan s'étend vers l'est jusqu'à la longitude de Bakel au Sénégal². Ce sont pour l'essentiel des grès ferrugineux (grès du Gorgol), des grès tendres, des argiles kaoliniques, etc.

Très localement dans la zone pilote, sur l'Éocène moyen, subsistent des buttes, dites du Continental terminal, dont le cycle de dépôt a commencé à l'Oligocène (milieu du Tertiaire) et s'est achevé par un cuirassement au début du Quaternaire³. P. Elouard⁴ estime toutefois que cette coupure Tertiaire-Quaternaire est arbitraire et qu'il ne faut peut-être pas cantonner les dépôts au Tertiaire et rejeter le cuirassement exclusivement au Quaternaire.

¹DALSTED 1982 p.34

²MICHEL 1973 p.80

³MESTRAUD 1975 p.57

⁴ELOUARD 1975 p.210

Quoi qu'il en soit, dans la région de Kaédi, le Continental terminal a un faciès relativement constant. Il s'agit d'un grès fortement argileux avec des auréoles ferrugineuses. Il est appelé grès de Kaédi. Cette couche détritique post-éocène est donc coiffée «... *d'une cuirasse ferrugineuse compacte, piquetée de grains de quartz, dont l'épaisseur dépasse souvent le mètre.*»¹. Les buttes cuirassées sont un des rares obstacles que nous ayons rencontré au cours de l'inventaire de cette zone ; «*l'épaisseur du Continental est de l'ordre de quelques dizaines de mètres dans cette région.*»².

Ces buttes fournissent un bon moyen de localisation dans la recherche des segments mais sont une gêne pour la progression. Elles sont évidemment difficiles à franchir. L'enquêteur perd donc du temps lorsqu'il faut rallier, souvent à pied ou après un large détour en véhicule tout terrain, un segment sur leur sommet ou un autre versant. De plus, le glacis de piémont qui les ceinture est fortement raviné, obligeant là aussi à des contournement coûteux en temps d'enquête. Ces buttes se trouvent de part et d'autre du Gorgol (cf. fig. A.8.2).

En dehors des couches sédimentaires du Tertiaire et hormis les cuirasses ferrugineuses, la carte géologique apporte de nombreux renseignements sur les dépôts du Quaternaire. Ici aussi de larges traces de l'Ogoliien subsistent. Elles sont toutefois nettement moins couvrantes dans le cas de Lekseïba que dans celui de Rosso, mais elles sont plus diverses.

Dans la zone pilote, les dépôts ogoliens se trouvent majoritairement en bordure du Gorgol. On les rencontre sous forme de dunes rouges ou de remblais sablo-argileux. Leur épaisseur et leur forme ne posent aucun problème de pénétrabilité. Ils sont le contact entre le diéri et le wallo. Ce dernier, malgré les hautes levées des dépôts post-nouakchottien constitués de sable fin et de limon, ne pose pas de problème de circulation en raison de son modelé. En revanche, les nombreuses cuvettes argileuses de décantation et les nombreux bras du Gorgol qui circule entre les levées actuelles et sub-actuelles posent un réel problème de pénétrabilité.

La période de submersion dans le Gorgol est décalée par rapport aux crues du Sénégal en raison du fonctionnement d'une vanne depuis 1975. Cette vanne permet d'envoyer plus complètement et plus durablement les terres de wallo du Gorgol puis de pratiquer en décrue une culture de sorgho essentiellement (cf. 3.3.) sur 21 000 ha théoriques. En effet, une fois les hautes eaux du Sénégal atteintes, la vanne est fermée, elle ne sera rouverte que vers la mi-octobre une fois l'imprégnation

¹MICHEL 1973 p.85

²MESTRAUD 1975 p.57

suffisante. Comme la vanne ne peut encaisser qu'une pression équivalente à un dénivelé de 3,50 m de part et d'autre des installations, il y a en général plusieurs ouverture-fermeture dans la saison.

Pendant que la vanne est fermée, le Gorgol continue d'être alimenté par la retenue de Foum Gleïta. De ce fait, le dernier lâcher d'eau, vers le Sénégal, intervient à la mi-octobre et la vidange est terminée à la mi-novembre. Pendant toute cette période et même bien après, il n'est possible de passer d'une rive à l'autre que par les ponts de Kaédi et de Lekseïba. Le lit mineur est encore en eau par certains endroits en mars-avril. Il arrive parfois que l'on puisse y observer le véhicule d'enquêteurs ayant voulu couper au plus court pour économiser le précieux temps d'enquête.

Enfin, avant de conclure ce paragraphe, signalons à l'ENE en bordure de la zone pilote les schistes de la série de Mbout. Ce contact avec l'extrême-ouest de la chaîne hercynienne des Mauritanides marque aussi la limite orientale de l'aquifère du Trarza. Cette limite est connue sous le nom de biseau sec. Elle correspond à l'enfoncement progressif du socle sous les couches sédimentaires. Sur une vingtaine de kilomètres, parallèlement à la chaîne des Mauritanides, les puits atteignent le socle au-dessus du niveau piézométrique¹ (niveau hydrostatique de la nappe). Il n'y a donc pas de puits en dehors de ceux alimentés par le Gorgol.

En conclusion, la majeure partie des problèmes de pénétrabilité du milieu est liée, comme pour Rosso, à la période d'inondation et à son extension spatiale. Cependant, il ne faut pas croire que la contrainte hydrographique est uniquement localisée sur les dépôts quaternaires de la vallée du Gorgol, car en effet, il faut lui associer celle des nombreux oueds temporaires qui prennent naissance aux pieds des buttes cuirassées lors des courtes mais violentes averses.

Le lit de ces oueds, ^{ou} *batha* (hassania), peut parfois faire plusieurs dizaines de mètres de large d'un beau sable alluvionnaire très mou. Son franchissement, impossible lors des crues liées aux averses, nécessite un puissant véhicule tout terrain une fois le sable asséché. Comme on le voit, l'inventaire pastoral rencontre sur cette zone plus de difficultés que pour celle de Rosso, et comme cela sera décrit plus loin, l'absence de puits sur certains secteurs, combinée à des glacis très décapés, limite l'intérêt pastoral d'une partie de la zone d'étude.

3.1.3. La zone pilote de Kouroudjel et El Fa'iya

A l'est du massif gréseux de l'Assaba, le secteur des palmeraies n'est pas couvert par la cartographie à moyenne échelle du Bureau de Recherche Géologique et

¹TOUPET 1977 p.39

Minière (BRGM) que nous avons exploitée pour les deux précédentes zones pilote. Nous avons dû utiliser une documentation un peu moins fine mais suffisamment précise pour notre niveau d'analyse. Il s'agit essentiellement de la carte géologique de l'Afrique Occidentale à 1/2 000 000 et du croquis à 1/2 500 000 que P. Michel¹ en a tiré pour les bassins versants de la Gambie et du Sénégal.

Bien que notre zone pilote, appelée par commodité "zone des palmeraies", soit essentiellement localisée sur des accumulations sableuses quaternaires, il faut signaler la présence de dépôts plus anciens. A l'ouest, la zone d'étude est dominée par «*l'ensemble de ces formations essentiellement gréseuses, d'une puissance approximative de 300 m, [qui] constitue la série cambro-ordovicienne de l'Assaba-Tagant.*»². Ces formations tabulaires primaires du Cambrien supérieur et de l'Ordovicien reposent elles-mêmes sur la série schisto-dolomitique (série de Kayes) du Cambrien inférieur³. Ce n'est que plus à l'est que l'Infracambrien devient affleurant.

Cependant, comme le signale C. Bense⁴, les premiers affleurements de l'Infracambrien peuvent apparaître dans le lit du Karakoro sous la forme de pélites et de jaspes appartenant à la formation de Bouly. Nous avons effectivement constaté dans la zone pilote, à l'est de Kouroudjel, des bancs rocheux pouvant correspondre à cette description. En l'absence d'analyse plus poussée, ils ont toutefois été cartographiés sous l'appellation "affleurement rocheux"⁵.

Enfin, le placage sableux du Quaternaire fait partie de «*ces ergs anciens [qui] s'étendent depuis le littoral atlantique jusqu'à l'escarpement gréseux du Dhar Néma, qui ferme à l'est la vaste boutonnière du Hodh.*»⁶. Le massif dunaire qui est venu buter sur l'Assaba, poussé par les alizés du NE, est donc de la même nature que celui du Trarza décrit pour le site de Rosso ; nous n'y reviendrons pas, les contraintes sont les mêmes. Précisons cependant que l'enquête en zone de palmeraies s'est déroulée exclusivement en saison sèche. Nous ne nous sommes donc heurté à aucune contrainte d'origine hydrographique ; il en aurait été tout autrement en saison des pluies.

Pour conclure cette section sur les contraintes liées au milieu physique, il faut constater que la majorité des problèmes de pénétrabilité du milieu viennent de contraintes d'ordre hydrographique. En effet, le Sahel mauritanien, tout du moins

¹MICHEL 1973 planche II

²TOUPET 1966 p.73

³MICHEL 1973 p.67

⁴BENSE 1959 p.129

⁵DE WISPELAERE 1989 p.109

⁶MICHEL 1973 p.498

pour la partie que nous en avons inventorié, est un milieu ouvert. A quelques exceptions près, il y a peu d'obstacles naturels qu'un bon véhicule tout terrain ne puisse franchir, ceci est certainement valable pour l'ensemble du Sahel, et peut-être même pour l'ensemble des régions arides.

Le mode d'inventaire que nous avons testé s'adapte parfaitement à ce type de milieu. Ceci reste valable tant qu'il n'y a pas de massifs rocheux impénétrables à inventorier, d'un point de vue temps et coût d'enquête, ni de zones à l'hydromorphie trop longue et trop marquée. Ce dernier point est, semble-t-il, le plus délicat. En effet, les zones hydromorphes, même dans les régions où les cours d'eau permanents sont rares, apparaissent comme un obstacle souvent infranchissable pour un coût raisonnable. Et, comme nous l'avons vu au chapitre 2, c'est en fin de saison des pluies, au moment où les mares et cours d'eau temporaires sont infranchissables, que l'inventaire pastoral est le plus fructueux. Nous verrons à la section 3.3. que ce n'est pas forcément le cas pour toutes les cultures. Avant cela, il convient d'indiquer sur quel type de paysage végétal naturel l'inventaire s'est déroulé, et la période pendant laquelle il est préférable d'opérer.

3.2. LES FORMATIONS VÉGÉTALES SPONTANÉES

Objet principal de l'inventaire pastoral, la végétation spontanée peut être étudiée sous de nombreux aspects. N'étant pas botaniste, nous nous bornerons à reprendre les résultats obtenus sur les zones pilotes par M. Carrière qui avait en charge le volet agropastoralisme du projet d'inventaire. Il nous a paru intéressant de coupler l'analyse du support édaphique et celle des types de végétation rencontrés, dans la mesure où les enregistrements radiométriques intègrent ces deux composantes (cf. 4.3.). Rappelons que ce phénomène est courant pour la végétation steppique, en général peu couvrante, du Sahel.

Le colloque de Yagambi¹ a créé une certaine unité en classant la végétation par type physiologique. Cela permet communément de rattacher le Sahel mauritanien à la steppe à épineux. Schématiquement caractérisée par une formation herbacée ouverte où les plantes annuelles sont dominantes, cette steppe est rarement, voire jamais, parcourue par les feux, car la couverture herbacée est généralement discontinue et ne dépasse pas 80 cm de haut. La strate ligneuse est très peu couvrante, elle atteint rarement 10 p.100 de recouvrement. De même, elle est plutôt basse, les plus grands arbres culminent tout au plus à cinq ou six mètres. Cette steppe fait la transition entre la végétation désertique au nord, contractée dans quelques rares lieux favorables, et la savane soudanienne au sud.

¹TROCHAIN 1957

Il convient toutefois d'affiner cette description, car malgré une forte unité physiologique, comme le fait remarquer G. Boudet¹, «à l'exception des espèces à distribution phytogéographique restreinte, les espèces [rencontrées] présentent une aire de distribution très vaste, mais leur amplitude écologique est variable et particulièrement sensible à la distribution topographique et à la nature du substrat ...».

La description des paysages végétaux des trois zones d'étude s'est inspirée de cette remarque, ils sont donc présentés par caractère édaphique et géomorphologique en fonction essentiellement de l'analyse qu'en a fait M. Carrière² pour l'atlas des potentialités pastorales de la Mauritanie. L'analyse des formations végétales présentées ici se veut très synthétique. Pour ne pas faire double emploi avec le rapport d'inventaire³, nous n'en avons pas repris les analyses fines publiées par station. Le lecteur désireux de plus de précisions s'y reportera, c'est un des compléments techniques possibles de cette recherche méthodologique.

Tout comme pour l'analyse du support géologique des sites d'enquête, la description est organisée par zone pilote. A l'intérieur de celle-ci, les espèces végétales caractéristiques et les principaux types de sol sont détaillés. Avant d'analyser séparément les trois zones pilotes, rappelons qu'elles ont de nombreux points communs à commencer par l'appartenance à la même division bioclimatique, à savoir la région nord-sahélienne. C'est la région la plus représentative du Sahel mauritanien. D'un point de vue climatique, elle est comprise entre les isohyètes 200 et 350 mm (cf. 2.1.).

Cette division bioclimatique a été subdivisée en plusieurs types de formation. Chaque paysage a été rattaché à un seul type de formation. La synthèse des paysages végétaux des trois zones pilotes se comprend comme suit :

- les formations sur sable
- les formations de systèmes dunaires
 - les cordons dunaires et dépressions interdunaires (zone de Rosso) **CD**
- les formations sableuses non dunaires
 - les ensablements sur regs (zone de Lekseïba) **SG**
 - les sables limoneux (zones de Rosso et de Lekseïba) **SL**

¹BOUDET 1984 p.113

²CARRIERE 1990 : 3-4

³DE WISPELAERE 1989

- Figure 3.2 - les sables ondulés (zone des palmeraies) **SO**
- les formations enrichies en éléments fins
 - les regs limoneux (zone de Lekseiba) **GL**
 - les limons sableux des vallées fossiles (zone des palmeraies) **LS**
 - les vertisols argileux (zones de Rosso et de Lekseiba) **VA**
 - les formations lithiques
 - les plateaux cuirassés (zone de Lekseiba) **PC**

Tous ces types de formation ont été localisés schématiquement par zone pilote sur la figure 3.2. Ils donnent un premier aperçu de la répartition des milieux. Ils sont toutefois assez loin d'en décrire la complexité (cf. 8.).

3.2.1. La zone pilote de Rosso

Elle comprend les formations sur sable et les formations enrichies en éléments fins. Les formations sur sable sont représentées par les formations des systèmes dunaires et non dunaires.

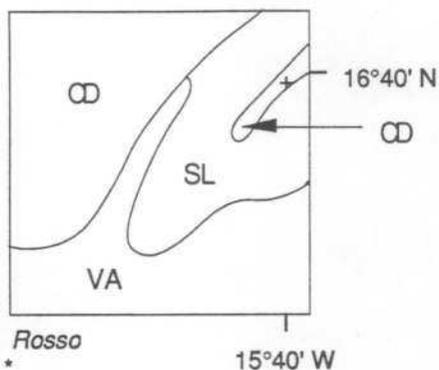
Les formations de systèmes dunaires regroupent les formations sableuses à relief accentué qui présentent de forts dénivelés. Une seule de ces formations est présente dans nos zones pilotes. Il s'agit des **cordons dunaires et dépressions interdunaires (CD)**.

Ces formations sont implantées sur les massifs de dunes rouges de l'Ogolien. Rappelons à la suite de P. Michel¹, citant lui même J. Tricart, que la couleur rouge caractéristique de cette génération de dune est liée à un processus de rubéfaction qui a teinté le sable en surface. Les oxydes de fer responsables de cette rubéfaction sont en général de couleur rouge, brun-rouge ou orangé. En profondeur ou dans les interdunes, les couleurs sont plus claires, elles tirent sur le beige ou le blanc-jaune.

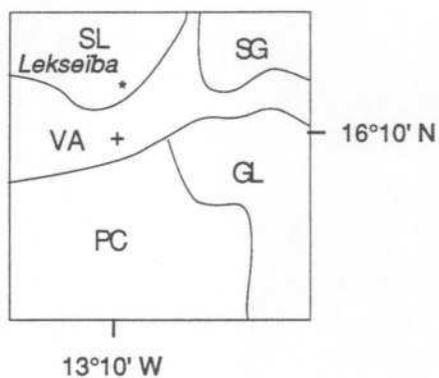
¹MICHEL 1973 p.497

figure 3.2 - Les grands traits du paysage végétal

Rosso

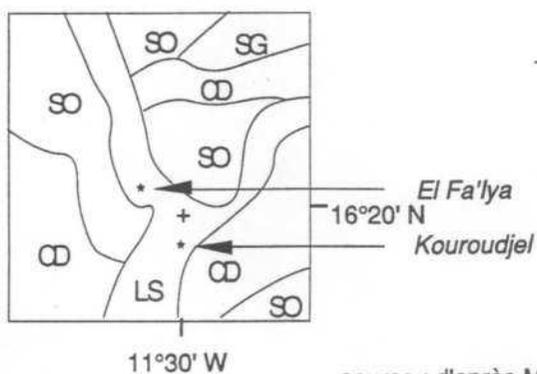


Lekseïba



CD cordons dunaires
 GL regs limoneux
 LS limons sableux
 PC plateaux cuirassés
 SG ensablements sur regs
 SL sables limoneux
 SO sables ondulés
 VA vertisols argileux

Palmeraies



source : d'après M. CARRIERE 1990 : 7-8.

Les sols sont à pente modérée à assez forte, ils peuvent être assez profonds, avec une texture grossière à assez grossière. Les sols dominants sont à sable fin avec un profil de sol à développement minimum. Le drainage est en général très important sauf dans certaines interdunes assez étroites où les éléments fins sont en assez forte proportion¹.

Le couvert ligneux de ces formations est surtout composé de *Balanites aegyptiaca*, *Acacia senegal* et *Leptadenia pyrotechnica*. L'*Acacia raddiana* est absent des dépressions accentuées mais présent sur les dômes et pentes dunaires. Les graminées sahéliennes les plus fréquentes sont les suivantes : *Cenchrus biflorus*, *Cenchrus prieurii* et *Aristida mutabilis*. Si la pression animale est forte, ces graminées laissent la place à des espèces moins appréciées telles que *Eragrostis ciliaris* ou *Heliotropium ramosissimum*².

Dans les interdunes, pour peu que l'on atteigne les argiles lacustres, l'*Acacia senegal* et l'*Acacia seyal* sont remplacés par *Salvadora persica*. Les graminées à port grêle comme *Schoenefeldia gracilis* et *Eragrostis pilosa* dominent généralement.

Ce système dunaire est très souvent surpâturé car proche des points d'eau dans la zone pilote. Il a de plus une forte potentialité pastorale, car des espèces comme *Cenchrus biflorus*, *Cenchrus prieurii* et *Aristida mutabilis* peuvent produire, sous de bonnes conditions pluviométriques, une tonne de matière sèche à l'hectare.

Terres de parcours mais aussi de collecte du bois de feu, ces systèmes dunaires voient leur couvert ligneux très malmené par des prélèvements surabondants. Ceux-ci ne s'effectuent pas uniquement sur le bois mort mais aussi parfois sur des individus vivants. Nous avons examiné des gommiers (*Acacia senegal*) dont les racines plagiotropes, chargées de collecter l'eau de pluie en surface, avaient été sectionnées. Ceci entraîne très rapidement la mort de l'arbre, et le charbonnier peut alors sans risque, vis-à-vis du code des eaux et forêts qui interdit la coupe des arbres vifs, réaliser son charbon de bois. On peut de même considérer que la collecte de la gomme arabique par les bergers devrait continuer de décliner avec la raréfaction lente mais constante des *Acacia senegal* et autres Mimosacées épineuses fournisseuses de gomme.

Les formations sableuses non dunaires sont beaucoup moins pentues que les précédentes, elles ne concernent pour la zone pilote de Rosso que les sables limoneux (SL).

¹DALSTED 1982 p.78

²CARRIERE 1990 p.3

Sous l'appellation **sables limoneux** ont été regroupées les formations pour lesquelles le profil pédologique est sableux en surface et argileux en profondeur. Ce système correspond souvent aux anciens dépôts alluviaux localisés le long des vallées actuelles du Sénégal (zone pilote de Rosso) et du Gorgol (zone pilote de Lekseiba).

L'horizon supérieur sableux est doté d'une bonne réserve hydrique en raison du faible drainage lié à la couche d'argile sous-jacente. La texture est fine à modérément fine suivant la position dans le profil et la présence de limons¹. En raison d'un ruissellement en nappe, la surface de ce système est hétérogène, elle est alternativement constituée d'ensablements en forme de buttes (accumulation) et de glacis décapés (érosion).

Sur les petites buttes, les ligneux les plus courants sont *Bauhinia rufescens* et *Maytenus senegalensis*. Lorsque l'horizon sableux s'épaissit, en s'éloignant du centre de la vallée, apparaissent *Ziziphus mauritiana*, *Combretum glutinosum* et *Balanites aegyptiaca*. Différents couverts herbacés caractérisent ce système. *Panicum laetum* colonise les micro-cuvettes les plus humides, tandis que *Cenchrus biflorus* se remarque sur les bombements sableux. Enfin, comme le fait remarquer M. Carrière², là où le bétail stationne le plus longtemps, ce sont des peuplements de *Tribulus terrestris* et *Boerhavia repens* qui dominent. Face à une telle diversité de couverts, il est difficile d'évaluer une productivité moyenne à l'hectare, sans oublier que les plages nues occupent sans difficulté 50 p.100 du système.

Enfin, dernière composante des paysages de Rosso, les formations sur sols enrichis en éléments fins. Parmi celles-ci, seuls les **vertisols argileux** (VA) sont présents à Rosso (cf. fig. 3.2).

Les argiles vertiques sont limitées aux vallées alluviales et à leur défluent. En fonction de la position par rapport à la crue, l'alluvionnement est plus ou moins important et l'imbibation du sol suffisante pour la culture ou seulement pour les pâturages. La tendance vertisolique se confirme lorsque l'on se rapproche du lit mineur.

En fonction de la position topographique, donc de la durée de l'inondation, et de la pression humaine, la végétation est relativement différente. Dans les cuvettes à inondation marquée, l'activité agricole et les charbonniers ont beaucoup restreint l'extension de *Acacia nilotica* qui ne subsiste pratiquement plus à l'état de peuplement. Si l'eau stagne suffisamment longtemps, la strate herbacée comprend

¹DALSTED 1982 p.79

²CARRIERE 1990 p.3

des espèces comme *Echinochloa colona* ou *Echinochloa stagnina*, le bourgou, pour les inondations les plus longues (quelques semaines).

En position intermédiaire, là où l'inondation est plus courte, on rencontre *Panicum laetum* et *Eragrostis pilosa*. En position exondée et sur un substrat souvent plus sableux, se développe *Schoenefeldia gracilis*. A proximité les ligneux les plus courants sont *Ziziphus mauritiana* et *Bauhinia rufescens*.

Pâturage très recherché, les bourgoutières peuvent produire jusqu'à trois tonnes de matière sèche à l'hectare¹. Ce système est aussi celui des cultures irriguées et de décrue (cf. 5.9.). La rencontre des deux activités sur ce domaine est une source de conflit permanent.

3.2.2. La zone pilote de Lekseïba

La zone pilote de Lekseïba est plus diversifiée que celle de Rosso. Si elle ne comporte plus de formations sableuses dunaires, une nouvelle formation sableuse non dunaire apparaît. Il s'agit des ensablements sur regs (SG).

Les **ensablements sur regs** sont essentiellement localisés sur les schistes au nord-est de Lekseïba. Caractérisé par de vastes surfaces planes, ce système comporte un ensablement superficiel variable reposant sur un horizon gravillo-limoneux. L'espèce ligneuse présente dans la zone pilote et typique des regs est *Acacia ehrenbergiana*. C'est l'épaisseur de la nappe de sable qui détermine ensuite la composition floristique, *Cenchrus biflorus* et *Cenchrus prieuri* voient leur domination décroître au profit d'espèces à port prostré dès lors que l'ensablement superficiel se réduit à un simple film.

Les sables limoneux (SL) sont encore représentés, mais comme ils sont analogues dans les deux zones, ils ne seront pas redécrits. Tout comme les argiles vertiques (VA) pour lesquels la seule différence de description tient dans la présence de quelques beaux spécimens d'*Acacia albida* dans la zone d'inondation du Gorgol. Il n'y en a que quelques individus isolés dans la zone pilote de Rosso. En revanche, une autre formation sur sols enrichis en éléments fins est présente à Lekseïba, il s'agit des regs limoneux (GL).

Les **regs limoneux** constituent de vastes plaines alluviales vannées par le vent. Proche des lithosols, ils s'en différencient par un horizon supérieur limoneux, souvent induré, sur lequel l'eau de pluie ruisselle. La végétation se concentre sur les rares obstacles qui piègent matériaux et graines ou dans les talwegs. La végétation

¹CARRIERE 1990 p.4

ligneuse est très dispersée et composée de *Caparis decidua*, *Maerua crassifolia* et *Acacia ehrenbergiana*. Les réserves hydriques étant limitées, la strate herbacée l'est aussi. Seules quelques touffes d'*Aristida adscensionis* et *Aristida funiculata* parsèment les sols nus.

Enfin, dernières formations représentées dans la zone pilote, les formations lithiques ne sont présentes que sur le secteur de Lekseïba. Elles sont constituées de paysages végétaux établis sur les plateaux cuirassés et le glacis qui raccorde à la vallée du Gorgol.

Le système des **plateaux cuirassés** (PC) est constitué de plateaux aux rebords plus ou moins démantelés avec des éboulis, et de quelques collines et buttes témoins de part et d'autre du Gorgol. La roche ferruginisée n'est jamais apparente sur de grandes surfaces car en général un sol limono-sableux peu profond s'est développé sur ces sols relativement plans¹. Des blocs démantelés et des gravillons se retrouvent çà et là sur le glacis.

Ce système a été cartographié par M. Mosnier² et G. Boudet en 1961 comme portant un couvert ligneux composé par une forte strate arbustive. Aujourd'hui, il ne reste plus que les bois morts de *Pterocarpus lucens* pour attester de la densité végétale d'il y a 30 ans. A de rares exceptions près, sur ces surfaces planes, seuls *Cenchrus biflorus* semble se maintenir en vie sur des piégeages de sables. En effet, en dehors de quelques cuvettes collectant les eaux de ruissellement et où se maintiennent quelques végétations relictées, la vie végétale est insignifiante. C'est probablement le système qui a le plus souffert de la récente sécheresse.

En dehors de la proximité de la vallée du Gorgol, matérialisée par les argiles vertiques (cf. fig. 3.2), il y a peu de points d'eau sur la zone pilote de Lekseïba. En effet, le "biseau sec" (cf. 3.1.) passe sous l'extrémité est du secteur, il correspond approximativement à l'emprise des ensablements sur regs (SG) et à une partie des regs limoneux (GL). Il est dénué de puits. Les plateaux cuirassés (PC) n'en possèdent aucun dans la zone pilote. Il faut aller plus au sud pour trouver deux puits destinés à l'hydraulique pastorale. La pression animale sur les faibles pâturages de ces formations est donc peu élevée car la distance aux points d'eau du Gorgol est importante. Nous verrons plus loin quels sont les animaux qui peuvent en profiter et à quel moment (cf. 1.2.).

¹DALSTED 1982 p.94

²MOSNIER 1961

3.2.3. La zone pilote de Kouroudjel et El Fa'iya

Cette zone pilote, comme celle de Rosso, comporte d'importants placages sableux. De ce fait, on retrouve les cordons dunaires et dépressions interdunaires (CD) des formations sableuses dunaires, qu'il n'est pas nécessaire de redécrire (cf. 3.2.1.), mais pas les sables limoneux (SL) des formations sableuses non dunaires. Ils sont remplacés par un système non encore rencontré, les sables ondulés (SO).

Le système des **sables ondulés** est particulier à la zone des palmeraies. Il correspond à de vastes plaines plus ou moins ondulées. Le sol est presque plan ou à pente douce, il est profond, avec un drainage très important et une texture grossière¹. Le sable y est fin, de couleur beige à jaunâtre et le développement du sol modéré à minimum.

La strate ligneuse est peu dense, elle est principalement représentée par *Combretum glutinosum*, *Balanites aegyptiaca* et *Acacia senegal*. Le tapis herbacé est très homogène avec une nette domination de *Cenchrus biflorus* qui peut atteindre un recouvrement de 100 p.100 et une à deux tonnes de matière sèche à l'hectare si la pluviosité le permet².

Les vertisols argileux ne sont plus représentés dans les formations sur sols enrichis en éléments fins. Ils sont remplacés par les limons sableux des vallées fossiles (LS), système proche du précédent mais dont l'origine des particules et le régime hydrique différent.

Le système des **limons sableux des vallées fossiles** est caractéristique de l'oued Karakoro, où les sols sont de texture modérément grossière, en pente douce, profonds et avec un drainage important³. Les limons occupent de larges vallées bordées de sable. Ils bénéficient d'un écoulement temporaire assurant un alluvionnement régulier. Le substrat est grisâtre et induré en surface. L'ensablement est fréquent en périphérie. La flore est donc variable suivant sa position sur le toposéquence. En dehors des bombements sableux du lit de l'oued, se développe une prairie sub-continue à *Schoenefeldia gracilis* et *Eragrostis pilosa*. L'*Acacia seyal* peut former des fourrés denses dans les sites favorables et lorsque la nappe est proche, des palmeraies à dattier (*Phoenix dactylifera*) et à doum (*Hyphaene thebaïca*) se développent, ainsi que les cultures.

La zone pilote des palmeraies ne comporte pas de formations lithiques, bien que des affleurements rocheux soient présents (cf. 3.1.3.). Ils ne sont pas apparus

¹DALSTED 1982 p.73

²CARRIERE 1990 p.3

³DALSTED 1982 p.99

comme suffisamment importants pour qu'à cette échelle, très synthétique, de description et d'analyse, ils puissent être mentionnés. Les formations végétales qu'ils abritent sont certainement caractéristiques mais de toute façon négligeables en quantité par rapport aux autres formations.

En conclusion, cette description axée sur la physionomie des différentes formations végétales tend à démontrer que les trois zones pilotes sont relativement différentes dans l'analyse qu'elles peuvent permettre du Sahel mauritanien. Plusieurs milieux sont présents. Ils sont représentatifs à quelques exceptions près du Sahel du sud-ouest de la Mauritanie.

Comme nous le savons maintenant depuis plusieurs années et comme l'analyse du climat nous l'a confirmé (cf. 2.1.), ces milieux ont subi et subissent encore, une forte péjoration climatique. En effet, et bien que cette analyse soit plus physionomique que floristique, nous n'avons cité, par exemple, aucune espèce herbacée vivace. Cela est dû à leur quasi-disparition du paysage des zones d'enquête. Le climat n'est bien sûr pas le seul en cause car la "dent" de l'animal y est pour beaucoup mais le surpâturage n'explique pas tout.

Comme l'a constaté M. Carrière¹, pour 400 taxons récoltés sur l'ensemble de la Mauritanie, 60 p.100 appartiennent au type biologique des thérophytes. Cela signifie que se sont généralement des plantes herbacées annuelles qui passent la saison défavorable sous forme de graines très résistantes à la sécheresse². Ces thérophytes sont accessibles au bétail pendant la saison sèche, mais risquent moins la destruction que les vivaces. Ceci permet, malgré les rigueurs du climat et la pression animale, d'assurer une partie du couvert végétal tous les ans.

Enfin, la destruction de la quasi totalité des "forêts" de *Pterocarpus lucens* sur les buttes cuirassées du Gorgol ne peut pas être attribuée au surpâturage mais bien à une modification des conditions pluviométriques. Cette disparition des seules formations arbustives un peu denses renvoie à notre problématique d'inventaire.

La description synthétique des formations du Sahel mauritanien que nous venons d'effectuer met en évidence l'absence "d'obstacles" végétaux qui pourraient entraver la réalisation de l'inventaire dans ce type de milieu. En effet, nous n'avons pas étudié de formations végétales ligneuses denses suffisamment étendues pour constituer un réel problème pour l'opérateur. Rappelons que les problèmes évoqués sont principalement de deux ordres : pénétrabilité du milieu et localisation dans celui-ci. Toutes les formations rencontrées sont des formations "ouvertes", d'un

¹CARRIERE 1989 p.31

²HUETZ de LEMPS 1970 p.9

point de vue végétal, le milieu se prête donc parfaitement à des inventaires par méthode aléatoire (cf. 5.2.2.).

Les formations végétales naturelles sont dans leur ensemble relativement accessibles à l'œil du satellite. Pour peu que la méthode d'inventaire utilisée soit rigoureuse, il est même possible d'en dresser une cartographie et des statistiques dont on peut apprécier la fiabilité et le niveau de précision (cf. 8. et 9.). L'inventaire des cultures pose un tout autre problème en région sahélienne. Problème qui n'est pas forcément plus simple à résoudre que celui de la végétation naturelle malgré (ou à cause de) la présence d'un parcellaire.

3.3. LES CULTURES

Avec environ 30 p.100 de son produit intérieur brut et 66 p.100 de sa population active dans le secteur primaire¹, la Mauritanie conserve un "secteur traditionnel" prépondérant pour son économie. Bien que la pêche en mer soit une activité en plein essor, elle est peu le fait des mauritaniens. Ceux-ci restent essentiellement des agro-éleveurs. Cependant, en raison de la faiblesse des précipitations, la composante agricole du paysage est assez restreinte, les cultures se contentent de "parsemer" les trois zones d'étude.

Il n'est pas question de réaliser ici un descriptif des cultures rencontrées sur les zones pilotes mais plutôt d'envisager la stratégie à adopter lorsque l'on cherche à les intégrer dans la procédure d'inventaire. Il s'agit, tout comme pour la végétation naturelle, de savoir quels sont les grands types de cultures que l'on risque de rencontrer, dans quelle partie de la zone d'étude (préférentiellement) et à quelle date. Enfin, est-ce que cette date est compatible avec les autres impératifs de l'inventaire ?

3.3.1. Les principaux types de culture

Comme pour une grande partie de l'Afrique occidentale, les trois types de cultures rencontrées sont les cultures pluviales, les cultures de décrue et les cultures irriguées. La composante désertique de l'agriculture mauritanienne est affirmée par les productions oasiennes.

¹Encyclopædia UNIVERSALIS 1991 p.337

3.3.1.1. Les cultures pluviales

Localisées dans le diéri ou sur les terres du *fondé* (levées alluviales exceptionnellement atteintes par la crue)¹, les cultures pluviales sont tributaires de la saison des pluies. Or, comme cela a déjà été évoqué (cf. 2.1.), la diminution des précipitations depuis les années soixante-dix est très nette dans ce secteur et contrecarre probablement le développement des cultures sous pluie. En effet, nous n'en avons pas rencontré sur la zone pilote de Rosso ni sur celle des palmeraies. Ceci peut être soit la conséquence d'un échantillonnage trop faible, soit celle d'une réelle absence de la zone d'étude.

L'explication nous en est donnée dans le mémento de l'agronome². Le petit mil (genre *Pennisetum*) aussi appelé mil pénicellaire ou mil chandelle, la principale culture sous pluie de l'Afrique de l'ouest, nécessite un optimal de précipitation de l'ordre de 400 à 700 mm pour un cycle végétatif de 60 à 90 jours. Bien que 200 mm de pluie suffisent parfois, les précipitations des trois zones d'étude sont actuellement largement insuffisantes. En effet, depuis 1971, la moyenne des précipitations sur Kaédi (zone de Lekseïba) est de 245 mm, celle de Kiffa (zone des palmeraies) est de 221 mm et celle de Rosso 199 mm (cf. tab. 2.4). Si ce type de culture n'était pas trop aléatoire pendant la phase humide (1941-1970), ce n'est plus le cas actuellement.

La seule zone pilote où nous ayons constaté quelques tentatives de cultures pluviales est celle de Lekseïba. Il est vrai que les précipitations n'y sont inférieures à 200 mm depuis 1970 qu'une année sur cinq alors que pour Kiffa et surtout pour Rosso c'est une année sur deux (cf. Annexe 3). Dans ces conditions les rares lieux où l'on rencontre une agriculture pluviale dans le diéri sont les interdunes et des lits d'oued plus ou moins défrichés. En fait ce sont quelques points bas qui forment un impluvium naturel et où l'eau va pouvoir se concentrer un petit moment. Dans le fondé, certaines levées alluviales connaissent des conditions hydriques analogues grâce à la collecte des eaux de pluie.

En plus du mil, les autres cultures rencontrées sont toutes à cycles courts. Elles sont très souvent associées au mil. Il s'agit des haricots niébé (genre *Vigna*) et des melons béréfés (genre *Citrullus*). D'autres cultures sont peut-être présentes comme le maïs ou les gombos, mais nous n'en avons pas rencontré.

¹DOLLE 1984 p.38

²Ministère de la Coopération 1980 p.515

En conclusion, il est très difficile d'inventorier les cultures sous pluie dans la zone nord-sahélienne, car celles-ci sont d'une part très aléatoires et d'autre part, comme nous le verrons lors du dépouillement des fiches d'enquête (cf. 7.1.3.2.), très peu couvrantes et très disséminées. De plus, en fonction du calendrier d'enquête, comme les cultures de décrue dont nous allons parler maintenant, elles peuvent se confondre avec plusieurs états de la végétation naturelle.

3.3.1.2. *Les cultures de décrue*

Elles se localisent dans le wallo, c'est-à-dire essentiellement sur les terres alluviales des grands cours d'eau. Elles sont tributaires de la durée et de l'importance de l'inondation qui les a précédées. Celle-ci dure en général plusieurs semaines, alors que dans les oueds elle est de quelques heures, voire de quelques jours. Ch. Toupet¹ indique que la durée optimale de submersion est de cinq à six semaines. Cela correspond à celle pratiquée dans le Gorgol.

Les terres exploitées à la décrue sont réparties en deux terroirs distincts, le *hollaldé* et le *fallo*. Les termes désignant des terroirs de cultures sont pour la plupart halpoular car le fait des sédentaires noirs toucouleurs, majoritaires le long de cette partie du fleuve et s'adonnant depuis longtemps à la culture (cf. 1.1.).

Le hollaldé est constitué par les cuvettes de décantation au-delà du fondé, les levées de berges (cf. fig 3.3). C'est le terroir le plus propice à la culture de décrue. Le fallo est installé sur la berge perpendiculairement au cours d'eau. La durée de submersion n'est donc pas la même du haut en bas de la parcelle, les cultures parfois non plus. La principale culture de décrue est le sorgho (genre *Sorghum*) ou gros mil. Nous l'avons rencontrée dans les trois zones pilotes. Bien que probablement présentes, nous n'avons pas rencontré de cultures de niébé et de maïs.

Les cultures de décrue couvrent des superficies très importantes, car pour l'ensemble de la vallée alluviale et en fonction de l'intensité de la crue, les superficies cultivées ont été de 5 000 ha pour une crue très déficitaire (1973 et 1983), de 48 000 ha pour une crue moyenne faible (1970-71) et de 80 000 ha pour une crue forte (rive mauritanienne uniquement), mais la dernière remonte à 1950².

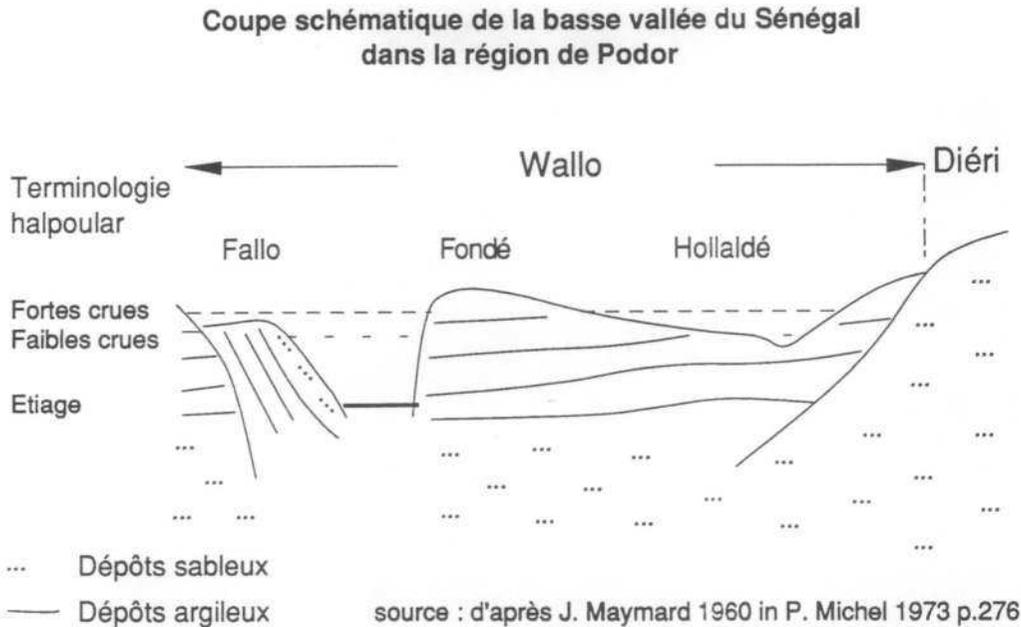
D'un aspect beaucoup plus massif que les cultures pluviales, les cultures de décrue ne passent pas inaperçues, ni dans le paysage ni sur l'imagerie satellitaire. Cependant, si elles tranchent sur le reste du paysage c'est, comme nous le verrons au

¹TOUPET 1977 p.91

²DOLLE 1984 p.34

paragraphe 3.3.2, en raison de leur activité biologique décalée par rapport au reste de la végétation. De ce fait leur appréhension est plus complexe qu'il n'y paraît.

figure 3.3 - Terminologie et localisation des principaux terroirs de cultures



3.3.1.3. Les cultures irriguées

Nous avons regroupé dans la catégorie des cultures irriguées les périmètres ou casiers irrigués que l'on retrouve le long du fleuve et les palmeraies enquêtées dans l'Assaba. Celles qui ont été enquêtées nécessitent en effet une irrigation pour le maraîchage et les plantations de dattier qui y sont effectués.

Comme le font remarquer S.M. Seck et A. Lericollais¹, la vallée du fleuve Sénégal fait figure dès l'époque coloniale de vallée à aménager. Les premiers essais de maîtrise de l'eau remontent à 1920 et les premiers casiers apparaissent en 1936 d'abord sur la rive sénégalaise (Richard Toll) puis sur la rive mauritanienne (Dar el Barka). Ceci explique la profusion de sites encore fonctionnels ou déjà abandonnés consacrés aux cultures irriguées dont on trouve la trace sur les images satellites et le terrain.

La plupart des périmètres irrigués rencontrés l'ont été sur la zone pilote de Rosso, mais quelques initiatives semblent toutefois démarrer sur la zone pilote de Lekseïba ; elles sont encore marginales. Dans la mesure où ce type de culture permet

¹SECK 1986a p.4

une meilleure maîtrise des rendements que les simples cultures de décrue, il a été largement encouragé.

Ces aménagements ont surtout servi au développement de la riziculture. En 1982¹, 77,1 p.100 des surfaces irriguées étaient cultivés en riz, 17,2 p.100 en maïs et seulement 5,7 p.100 en sorgho. Depuis, l'accroissement des superficies mises en culture a certainement continué d'être favorable à la riziculture. Pour l'ensemble de la Mauritanie, entre 1980 et 1986, la superficie des périmètres est passée de 5 300 ha à 10 400 ha². Le nouveau code foncier est entré en application en 1983 (cf. 1.1.2.).

Cependant, comme le notent V. Dollé³ *et alii*, si l'accroissement global est significatif, il faut noter de nombreux abandons. Dans la région de Rosso, entre les surfaces aménagées et les surfaces utilisables, supérieures à celles qui sont réellement utilisées, il y a 3 p.100 d'abandon, à Boghé 25 p.100 et à Kaédi-Gouraye 38 p.100.

De nombreux facteurs sont en cause pour expliquer ces abandons. En dehors des facteurs liés aux aménagements (pentes trop fortes, mauvaise maîtrise de l'eau, etc.) qui représentent tout de même 60 p.100 des causes d'abandon⁴, les facteurs agronomiques en représentent 20 p.100. Parmi ceux-ci, il en est un qui a attiré notre attention car il a été constaté sur le terrain et les images satellites, c'est l'invasion des parcelles par les adventices (cf. fig. 7.2, 7.5c et 8.4). En effet, V. Dollé⁵ *et alii* signalent, en l'absence d'un désherbage manuel délicat, une invasion progressive des parcelles de riz par des adventices comme *Cyperus rotundus*. Tous ces facteurs obligent le cultivateur à de fréquents déplacements.

Il n'est toutefois pas possible au cultivateur désireux de se déplacer de s'installer n'importe où. En effet, l'allocation des parcelles est semble-t-il toujours régie par le droit coutumier tant que l'état ne les a pas nommément attribuées à un privé. Depuis l'ordonnance du 5 juin 1983 qui a aboli le régime foncier traditionnel, dans un but de protection de l'environnement, l'état se réserve le droit de céder ou de vendre des portions de territoire sous certaines conditions⁶. Ceci pourrait être à l'origine des expulsions qui ont suivi le conflit inter-ethnique de 1989 (cf. 1.1.).

Les meilleures terres pour les cultures de décrue ou irriguées sont les cuvettes argileuses du wallo, les hollaldés, c'est là aussi que traditionnellement le droit

¹DOLLE 1984 p.49

²SECK 1986b p.20

³DOLLE 1984 p.49

⁴DOLLE 1984 p.122

⁵DOLLE 1984 p.125

⁶THIAM 1989 p.62

coutumier est le plus fort¹, car ces terrains sont pratiquement submergés tous les ans. Le fallo est pratiquement dans le même cas, à un degré moindre toutefois. En revanche, le fondé moins propice à la culture, car rarement inondé et peu arrosé par les précipitations, subit une emprise coutumière moins lourde et permet ainsi une installation plus aisée. Il a de ce fait été le lieu privilégié de l'installation des petits périmètres irrigués par les sociétés d'aménagement. Mais ici aussi, les moins bonnes terres sont rapidement abandonnées au profit des meilleures laissant dans le paysage de nombreuses traces de casiers dont il est difficile hors saison de dire s'ils sont en activité ou non. C'est un des problèmes auxquels se heurte l'inventaire. L'étude du calendrier agricole peut en partie le résoudre (cf. 3.3.2.).

Autre volet de l'agriculture irriguée, les palmeraies, qui ne sont présentes que dans la zone pilote de l'Assaba. Elles sont concentrées dans les lits d'oued. On parle de cultures irriguées pour le palmier dattier, les arbres fruitiers de l'étage intermédiaire et les sous-cultures (céréales, cultures maraîchères, fourragères et de rente). En revanche, le palmier doum ne nous a pas semblé être l'objet de soins attentifs, alors qu'il est encore très utilisé comme bois de construction. Il est vrai que sa multiplication semble se faire par rejet de manière anarchique et qu'il n'apparaît pas menacé de disparition.

Les deux palmeraies enquêtées, Kouroudjel et El Fa'iya, ont des réserves en eau dont l'importance est moyenne ou élevée mais de toute façon sous-exploitée². L'irrigation traditionnelle semble être assez aisée dans la mesure où la plupart des plantations sont "à la nappe". Lorsque l'on s'éloigne du centre de l'oued, les *oglat*, petits puits traditionnels, indiquent une nappe affleurante à cinquante centimètres ou un mètre. De ce fait, nous n'avons pas rencontré de motopompe et les trois *m'groud*, puits cimentés à exhaure animale, cadeaux semble-t-il des Marocains, ne sont plus fonctionnels.

Comme l'irrigation est aisée, nous avons constaté un nombre assez élevé de plantations de dattiers qui sont régulièrement arrosés pour que les racines puissent atteindre la nappe phréatique sous-jacente. En fonction de la proximité de celle-ci, la durée d'irrigation peut être très variable. Il en va de même pour les autres cultures irriguées, sauf que celles-ci sont plus tributaires du calendrier agricole que les dattiers. L'analyse de ce dernier est importante pour saisir le maximum de l'activité agricole des oasis avec le minimum d'images satellites et de phases d'enquête de terrain

¹JAMIN 1986b p.48

²FAO 1985 p.33

En conclusion, pour planifier la tournée d'inventaire et les acquisitions d'imagerie satellitaire, il est indispensable de connaître le calendrier des différentes spéculations agricoles susceptibles d'être inventoriées. Ceci même dans le cas d'un inventaire uniquement pastoral, car elles sont de toute façon une entrave à la circulation des animaux et des enquêteurs.

3.3.2. Inventaire et calendrier agricole

L'analyse du calendrier agricole est indispensable pour programmer les missions de terrain et l'acquisition de l'imagerie. Cependant cette analyse n'est pas une garantie de réussite dans une démarche de discrimination des cultures et de la végétation naturelle, sans parler de discrimination des cultures entre elles.

Le premier repère est la saison des pluies et son incidence sur la végétation non irriguée. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, il est possible de connaître la date de fin de période active de la végétation naturelle, à partir de la date moyenne ou mieux de la date probable de la fin de la saison des pluies. C'est à partir de cette date que nous avons établi notre programme d'inventaire.

En moyenne, sur les trois zones pilotes, la fin de la saison des pluies se produit, dans 50 p.100 des cas, lors de la deuxième décennie de septembre (cf. fig. 2.5). La fin de la période active de la végétation naturelle, en dehors des zones d'accumulation des eaux de ruissellement, se produit une vingtaine de jours après¹, soit à la fin de la première décennie d'octobre. Il n'y a donc plus en théorie de végétation herbacée verte, en dehors des points bas, après cette date. Comme nous l'avons constaté au point 2.2.2.2, il est préférable pour l'inventaire de la végétation naturelle que la prise de vue et l'enquête de terrain aient été réalisées avant la mi-octobre. Qu'en est-il pour les cultures ? Y-a-t-il compatibilité d'intérêts et de dates ?

- *Les cultures pluviales*

En ce qui concerne les cultures pluviales, il est nécessaire de s'intéresser en plus à la date des semis. Elle conditionne la date de végétation active puis de récolte. Cette approche n'a de sens que pour la zone pilote de Lekseïba, les autres étant trop déficitaires.

¹BOUDET 1981 p.9

Nous allons prendre à titre d'exemple une culture à cycle court d'environ 90 jours. Cela recoupe en partie le mil hâtif dont le cycle est de 60 à 90 jours¹ ou celui de certains sorghos pluviaux (90 à 110 j)², bien que ces derniers soient peu présents dans la zone d'étude et cantonnés dans des impluvium concentrant l'eau de pluie. Des cycles comparables sont observés pour le melon béréf (60 à 70 j) et le haricot niébé (80 j).

Dans le cas du mil, le semis a lieu avec les premières pluies, au mois de juin, mais en fait, comme le signale Ph. Cottereau³, la majorité des parcelles sont ensemencées au mois de juillet. L'explication est en partie fournie par la figure 2.5. En effet, sur celle-ci on voit clairement que l'on a 50 p.100 de chance de ne voir démarrer la saison des pluies ($P > 20$ mm) qu'à partir de la troisième décennie de juillet. Dès lors la récolte s'effectue environ 90 jours après, soit fin octobre. Le stade de maturation peut s'accommoder de pluies plus aléatoires⁴.

Dans la mesure où nous n'avons pu obtenir une image satellite sans nuage que pour le 22 octobre 1987, il convient de s'informer, dans un premier temps, de l'avancement du cycle végétatif à cette date pour les cultures pluviales. Puis, en fonction du résultat, il faut évaluer les possibilités de discrimination en fonction, cette fois-ci, de l'emprise au sol de ces cultures.

La consultation du tableau des précipitations décennales (cf. Annexe 3) confirme pour l'année 1987 ce qui avait été constaté en terme de probabilité au point 2.2.2.2, à savoir, un risque élevé de pluies pendant la première décennie de juin (68 mm en 1987) suivie de deux décennies sèches (0 mm). Si les cultivateurs ont semé à la suite de cette pluie, il est probable que la grande majorité des semis n'ont rien donné, d'où une confirmation supplémentaire du caractère aléatoire des cultures pluviales sur la région de Kaédi.

D'ailleurs, la consultation des précipitations de cette année n'indique aucune suite de plus de deux décennies ayant dépassé les 20 mm. Sur les neuf décennies qui se sont suivies de juillet à septembre, cinq sont inférieures à dix millimètres et une n'a reçu aucune précipitation. Cela explique l'aspect des parcelles de cultures pluviales, de toute façon très peu nombreuses, que nous avons inventoriées lors de cette campagne. Les seules qui pouvaient "prétendre" être récoltées étaient localisées dans les bas-fonds, les champs d'oued, les autres offraient un aspect particulièrement dévasté avec de grandes plages nues et peu ou pas de pieds arrivés à maturité.

¹Ministère de la Coopération 1980 p.515

²Ministère de la Coopération 1980 p.558

³COTTEREAU 1990 p.115

⁴DOLLE 1984 p.39

planche photo 3.1 - Cultures ou végétation spontanée ?



Cultures pluviales après récolte dans un champs d'oued
(sud de Lekseïba, mars 1987)

Il apparaît que la date de prise de vue obtenue, compte tenu du décalage dans la saison des récoltes, reste encore compatible avec leur recherche. Cependant, la discrimination avec la végétation naturelle est rendue très difficile par le morcellement des cultures et la concentration de celles-ci là où la végétation naturelle est encore la plus développée. En effet, la végétation verte, fin octobre, qu'elle soit naturelle ou cultivée, est concentrée dans les points bas où l'eau s'est accumulée et a stagné le plus longtemps. Géographiquement, la discrimination est complexe, mais ceci est aggravé par la taille réduite des parcelles.

Les enquêteurs des statistiques agricoles qui nous ont accompagné lors de certains inventaires, nous ont indiqué que pour le secteur de Lekseïba, la moyenne des parcelles tournait autour de 0,4 ha, soit un peu plus de 60 m sur 60 m. Dans ces conditions, et avec la précision de localisation dont nous disposions (cf. 6.3.), il n'était pas possible, d'une manière fiable, de localiser les parcelles inventoriées lorsqu'elles étaient dispersées. La planche photo 3.1 montre un exemple classique de parcelle peu défrichée à l'intérieur d'un oued où la végétation arbustive s'est concentrée.

En conclusion, l'étude du calendrier des précipitations confirme qu'il doit être possible d'appréhender les cultures pluviales en réalisant un inventaire pastoral. Cependant, on a vu que dans ces régions marginales où l'économie vivrière ne peut se baser sur la culture pluviale, le parcellaire est trop diffus pour être appréhendé sérieusement par la télédétection. De ce fait, lors des traitements cartographiques, ce thème a été affecté à son plus proche voisin radiométrique, la steppe arbustive (cf. 8.).

- Les cultures de décrue

Les cultures de décrue dépendent aussi pour partie des précipitations de l'année. Toutefois, avec les nombreuses retenues d'eau récemment mises en service, le problème de la submersion est en partie contrôlé et devrait permettre tous les ans une crue minimale autorisant une mise en culture même partielle après le retrait des eaux.

Pour obtenir une date de début de semis du sorgho de décrue, nous nous sommes basés sur les lâchers d'eau de la retenue du Gorgol. Ceux-ci, en moyenne, commencent mi-octobre et s'achèvent mi-novembre. La récolte aura lieu environ quatre mois plus tard. C'est-à-dire au plus tôt en février-mars. On aura compris qu'en l'absence d'enregistrement satellitaire de janvier-février, date où le sol est probablement suffisamment couvert et les premières récoltes non encore effectuées,

il n'est pas possible d'appréhender les cultures de décrue. Ces enregistrements viendront en plus de ceux de fin de saison des pluies, destinés à l'inventaire pastoral, mais aussi à faire la différence entre les zones inondées potentiellement cultivables et les zones réellement cultivées vers la mi-janvier.

En l'absence d'une image de cette période et malgré une tournée sur le terrain en mars 1987, il ne nous a pas été possible de faire cette évaluation. Il n'a pas non plus été possible de déterminer ce qui était resté en pâturage de décrue, alors que cet aspect est important pour l'élevage qui a de moins en moins accès à ce type de pâturage. Cela est lié d'une part à l'augmentation des aménagements le long du fleuve, ils sont associés à une plus grande maîtrise de l'eau donc de l'inondation¹, et d'autre part à l'accroissement des cultures de décrue dans le Gorgol depuis la mise en service de la retenue.

- *Les cultures irriguées*

En ce qui concerne les cultures irriguées, les contraintes liées à l'inventaire pastoral permettent semble-t-il d'appréhender la récolte de riz d'hivernage. En effet, la période optimale en fonction du cycle cultural le plus pratiqué, semble être un semis sur juillet-août, une montaison sur septembre-octobre et une récolte qui s'étale sur novembre-décembre.

Dans le cas d'une double riziculture sur le même cycle de culture à savoir, "riz de saison sèche chaude/riz d'hivernage", le cycle n'est pas décalé mais on perd l'inventaire d'une des récoltes à moins d'avoir une image associée à un inventaire en mai-juin. L'inventaire est indispensable pour vérifier si l'on a du riz ou une autre spéculation (maraîchage entre autres). Dans le cas du cycle de culture "riz de saison sèche froide/riz d'hivernage", il faut une image d'avril et une autre de septembre, soit pour l'hivernage une image presque un peu précoce, d'une part pour la nébulosité, d'autre part pour l'inventaire pastoral. Ce deuxième cycle de culture ne semble pas encore entré en vigueur dans la région, tout du moins pour le Sénégal², nous ne savons pas ce qu'il en est pour la Mauritanie.

En conclusion, pour ce qui est de la culture irriguée, il n'y avait aucune difficulté théorique pour en faire l'inventaire en même temps que les formations pastorales. Notons toutefois que la faiblesse des parcelles d'enquête qui les concernaient ne nous a pas permis de différencier d'une part les différents types de cultures irriguées, d'autre part les adventices des cultures (cf. 8.).

¹JAMIN 1986a p.27

²JAMIN 1986b p.47

Les cultures maraîchères n'ont quant à elles pas été identifiées en tant que telles en raison de la taille trop réduite des parcelles de cultures pour la zone pilote des palmeraies. La zériba est la parcelle généralement enclose d'épineux ou d'un petit muret où l'on trouve les palmiers dattiers, les sous-cultures et parfois un puits. Elle est en moyenne à Kouroudjel de 0,28 ha¹. Cela représente un peu plus de 50 m de côté, soit moins de trois pixels.

Malgré une certaine continuité des parcelles et parfois une localisation à découvert (sans dattiers pour faire écran), il n'a pas été possible de dissocier les cultures des palmiers. Elles ont donc été représentées par une classe commune². Cette impossibilité tient essentiellement à la faiblesse de résolution du capteur satellitaire utilisé (cf. 7.2.1.2.).

Toutefois, il faut signaler que la date de prise de vue (24/12/87 pour les palmeraies) était probablement le principal obstacle pour réaliser la discrimination cultures-palmiers car manifestement trop précoce. En effet, si l'on prend comme culture maraîchère de référence les tomates ou les oignons, effectivement cultivés sur El Fa'iya et Kouroudjel, la période de récolte est avril pour les oignons et va de mi-février à mi-mai pour les tomates³. Une image de janvier-février aurait donc été plus appropriée.

Notons qu'à cette période de l'année les épisodes pluvieux sont peu probables mais pas inexistants (cf. fig. 2.5) et que le risque de brume lié aux vents de sable peut atténuer la qualité des images. On aura donc tout intérêt, dans la mesure du possible, à prévisualiser les images avant de les acquérir.

De la même manière sur Lekseïba (nous n'en avons pas rencontré à Rosso) les cultures maraîchères sont effectuées à la saison fraîche, d'où leur nom de culture de contre-saison. Réalisées sur les levées des berges du Gorgol, en ce qui concerne la zone pilote, il ne nous a pas été possible avec la prise de vue datée du 22 octobre 1987 de les appréhender. De plus une seule unité d'enquête (K2D localisation cf. Annexe 4) nous a permis l'investigation de parcelles irriguées, cultivées à la date de l'enquête de fin de saison des pluies en sorgho et maïs puis en maraîchage lors de notre passage en saison fraîche. Quelle que soit la date de prise de vue, le nombre d'unités d'enquête était trop faible pour une analyse fiable.

¹FAO 1985 p.50

²DE WISPELAERE 1989 p.109

³DOLLE 1984 p.108

En conclusion, la date choisie pour la réalisation d'un inventaire pastoral, en fin de saison des pluies, permet d'appréhender certaines cultures. Il s'agit essentiellement des cultures pluviales et des cultures irriguées autres que le maraîchage. Les difficultés de discrimination viennent ensuite de la relation qui unit la résolution du capteur et la taille de la parcelle culturale.

En revanche, il n'est pas possible à cette date d'inventorier les cultures maraîchères, ni les cultures de décrue, il faut attendre la saison fraîche. Tout au plus peut-on déterminer la superficie inondée, donc potentiellement cultivable dans le cas des cultures de décrue.

Il semble donc qu'avec deux images on puisse avoir une vision complète, à l'échelle du satellite, de la campagne agropastorale. Une première image de **septembre-octobre** doit pouvoir fournir l'inventaire pastoral, les cultures pluviales et les cultures irriguées non maraîchères, ainsi que les surfaces en eau. Une seconde image de **janvier-février** doit fournir son complémentaire à savoir les cultures de décrue et l'essentiel du maraîchage. Notons toutefois que fournir ne veut pas dire discriminer à 100 p.100. Il reste à savoir si la taille du parcellaire et le nombre de parcelles enquêtées (cf. 7.2. et 8.1.) sont compatibles avec des résultats fiables.

A notre connaissance, l'arboriculture et les cultures fourragères, présentes dans les secteurs d'étude de Lekseïba et des palmeraies, ne l'étaient pas dans les zones pilotes. Le sondage ne les a tout du moins pas détectées. Nous n'avons donc pas approfondi le problème mais pensons qu'avec les deux dates de prises de vue retenues, il doit être possible de les identifier, voire de les discriminer des autres classes d'occupation du sol, si on les a rencontrées lors de l'inventaire.

En conclusion, il nous apparaît important de rappeler que le modelé de ces régions sèches ne semble pas être un obstacle tant d'un point de vue progression que d'un point de vue enquête à proprement parler. L'absence de massif rocheux important y est pour beaucoup. Le seul réel obstacle rencontré vient des contraintes hydrographiques. En effet, quelques zones inondées à la période d'enquête de fin de saison des pluies nous ont paru plus pénalisantes que le franchissement des dunes du Trarza et de l'Assaba ou le contournement de certaines buttes cuirassées du Gorgol. Or pour des questions de calendrier d'enquête, il n'est pas question d'attendre l'assèchement des zones hydromorphes.

Que ce soit pour la végétation naturelle et les cultures pluviales ou irriguées (hors maraîchage), la meilleure date d'enquête est celle de fin de saison des pluies, donc d'hydromorphie maximale. Cette date optimale pour la prise de vue et la prospection intervient avant la dessiccation, liée à l'arrêt des pluies, ou avant la

récolte, soit septembre-octobre. Pour les autres cultures, il faut envisager un inventaire de saison fraîche en janvier-février, avec prise de vue et terrain.

Comme nous l'avons démontré pour le Sahel mauritanien, la réussite de l'inventaire passe par l'analyse du calendrier des précipitations et de celui des cultures. Cependant, cette analyse ne garantit pas qu'il sera possible de discriminer tous les thèmes rencontrés sur le terrain et présents dans l'image. Elle permet tout au plus de déterminer la date où le maximum de spéculations végétales sera présent sur l'enregistrement satellitaire avec un stade végétatif compatible avec une possible identification.

La discrimination végétation spontanée-culture, voire discrimination des différentes formations végétales d'une part et d'autre part discrimination des cultures entre elles est plus complexe. Il faut :

- que les stades phénologiques des deux catégories que l'on cherche à discriminer soient légèrement décalés et discernables radiométriquement (il ne faut pas que l'effet sol masque tout) ;
- avoir suffisamment de parcelles pour fiabiliser l'analyse (classification, analyse de données, contrôle, etc.) ;
- que celles-ci soient suffisamment grandes pour être localisables, etc.

Nous sommes loin d'avoir pu analyser toutes ces contraintes. Cependant, il nous semble que c'est par leur étude sur plusieurs sites sahéliens que l'on parviendra à rendre parfaitement opérationnelles les méthodes d'inventaire développées ici pour les milieux arides.

En conclusion de cette première partie, il nous paraît important d'insister sur les points suivants. Alors que les hostilités entre le Sénégal et la Mauritanie semblent s'apaiser, les populations déplacées commencent-elles à prendre le chemin du retour ou bien sont-elles encore tenues à l'exil ?

Nous n'avons pas beaucoup d'informations à ce sujet, mais parmi celles qui filtrent, l'optimisme n'est pas encore de mise. Cette crise va avoir laissé de nombreuses séquelles. Pour notre part, elle a certainement conditionnée une partie des orientations de cette recherche, en nous contraignant pour partie à lui donner une orientation plus méthodologique que nous ne le souhaitions au départ.

A l'analyse, le milieu physique, tout comme le milieu humain, nous est apparu comme fragile. La péjoration climatique décrite par de nombreux auteurs pour l'ensemble du Sahel est très nette sur les zones d'étude. Elle a laissé de nombreuses

traces dans la végétation spontanée. Quelques espèces reliques survivent encore çà et là, mais d'autres plus nombreuses ont disparu ou n'existent plus qu'à l'état de bois mort, parfois dense, pour les espèces ligneuses. Un constat analogue peut être fait sur la végétation cultivée. Il n'y a pratiquement plus de cultures pluviales sur nos secteurs.

Cette dégradation générale des conditions de vie au Sahel a favorisé la multiplication d'études dont le but, pour certaines, est d'évaluer l'état de l'environnement puis de proposer des programmes de restauration, d'aménagement, etc. Or, les résultats sont parfois contradictoire d'une étude à l'autre. Pour les uns le désert avance, pour d'autres ce n'est pas prouvé. Il en va de même pour de nombreux exemples moins triviaux. A quoi cette différence de résultats est-elle due ?

Nous allons voir dans la prochaine partie, que les différences de résultats tiennent souvent à la façon dont les données qui les constituent ont été collectées. Certains milieux se prêtent plus que d'autres à la collecte. Le Sahel est un milieu ouvert où les conditions climatiques permettent de se déplacer et d'obtenir des images satellitaires une grande partie de l'année. Il doit donc permettre de réaliser des inventaires dans de bonnes conditions. Il faut toutefois respecter quelques règles très simples pour que l'inventaire d'occupation du sol à la base du diagnostic de l'environnement soit fiable simple et précis.

DEUXIÈME PARTIE

Contexte et objectifs méthodologiques

Force est de constater que depuis quelques années, pratiquement tous les inventaires d'occupation du sol sont accompagnés d'un volet télédétection. L'intégration de l'imagerie satellitaire au protocole d'inventaire n'est cependant pas équivalente d'une étude à l'autre et surtout d'un milieu à l'autre.

Jusqu'à présent en milieu tropical, la télédétection a surtout été utilisée pour se localiser sur le terrain et pallier l'absence de cartes récentes, positionner les relevés et réaliser une cartographie d'occupation du sol. Comparativement à l'utilisation qui en est faite dans les inventaires agricoles en milieu tempéré, on peut considérer que cet outil est sous-utilisé en milieu naturel tropical. Peut-il en être autrement ?

Nous allons au cours de cette deuxième partie dresser un bilan des méthodes usuelles d'inventaire et déterminer dans quelle mesure il est possible d'adapter au milieu naturel tropical les procédures fiables et précises qui en ont fait le succès auprès des services de statistiques agricoles européens et américains.

A la suite de quoi, les spécificités des inventaires pastoraux seront analysées. Cette analyse devra permettre d'élaborer quelques propositions visant à rationaliser la quantification des ressources pastorales.

Enfin, la description de la procédure de sondage retenue sera détaillée et l'objectif méthodologique précisé.

4. MÉTHODES USUELLES D'ENQUÊTE ET DE TRAITEMENT

Avant toute analyse des méthodes d'enquête et de traitement, il convient de s'interroger sur l'objet de la collecte. Ce n'est qu'après avoir déterminé le type d'informations recherchées qu'il sera possible d'analyser les méthodes de collecte disponibles. A la suite de quoi, la plus performante en termes d'efficacité de précision et de simplicité de mise en œuvre sera sélectionnée pour valoriser au mieux l'objet de cette collecte.

Les données recherchées sur le terrain doivent permettre une approche de la dynamique des milieux où l'évaluation pastorale constitue l'axe essentiel de la recherche. L'enquête de terrain doit permettre de recenser les différentes formations végétales présentes, et d'en évaluer la superficie, la répartition, la productivité, la dégradation, etc.. De même, elle doit fournir la fréquentation animale de la zone d'étude.

L'objectif, à terme, est de dresser un diagnostic de l'état de l'environnement à une date donnée pour savoir si la charge animale sur la zone étudiée est trop faible (sous-exploitation des potentialités pastorales), satisfaisante ou trop forte (sur-exploitation et risque de dégradation du milieu). A la suite de ce constat, la fiabilité des estimations issues de l'inventaire doit permettre de proposer des orientations d'aménagement.

Rappelons tout de suite qu'il ne nous a pas été possible d'aborder l'évaluation de la fréquentation animale sur les secteurs d'étude. Cette approche dépassait largement le cadre de ce travail et constituait un sujet de recherche à part entière. Il n'en demeure pas moins que cette approche a sa place au côté d'un d'inventaire d'occupation du sol.

Dès lors que le type des données à collecter est défini, il reste à déterminer comment doit s'opérer l'inventaire. La phase de terrain, comme nous venons de le voir, est primordiale. Cependant, elle n'est pas la seule à pouvoir nous fournir l'information recherchée. C'est cet aspect qu'il nous faut analyser maintenant.

4.1. POURQUOI SONDER ?

Si inventorier c'est acquérir une certaine connaissance du terrain, comment doit-être organisée cette connaissance ? Doit-elle être exhaustive ou peut-elle être simplement partielle ? Exhaustif signifie ici que l'ensemble de la zone d'étude a été inventorié individu par individu, c'est l'équivalent du recensement.

La réponse à cette question est fonction de l'échelle d'étude et de la taille de la zone à inventorier. En effet, il est peut-être possible d'effectuer le comptage de toutes les plantules présentes dans un plateau de coupe (cf. 5.2.2.), mais cela n'est déjà plus vrai au niveau de la station d'observation et encore moins du terroir agropastoral ; il en va de même pour l'observation des formations végétales ou du pourcentage des sols nus.

Or l'inventaire pour lequel nous cherchons à développer la méthodologie doit permettre la connaissance de zones d'études dont la superficie varie de quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'hectares. Il n'est alors plus possible d'envisager une vision autre que partielle mais toutefois représentative.

Rappelons que la méthodologie d'inventaire développée ici doit s'adapter à des secteurs de tailles très différentes. Ils peuvent avoir la taille des terroirs agropastoraux, soit une vingtaine de kilomètres de côté, comme les zones tests, soit être beaucoup plus grands, plusieurs centaines de milliers d'hectares comme les associations pastorales (cf. 6.1.).

Quelle procédure d'investigation envisager ?

4.1.1. Un échantillon représentatif

Quel chercheur, au retour d'une campagne de terrain, ne s'est pas interrogé sur la pertinence et la validité de sa collecte de données ? Nous avons tous, au cours de notre expérience de chercheur, constaté à un moment ou à un autre que certaines données nous faisaient défaut, partiellement voire intégralement. Car lors de notre présence sur le terrain, toujours trop courte, tel faciès d'importance non négligeable nous a échappé. C'est souvent lorsqu'il n'est plus possible de combler cette lacune que l'on s'en aperçoit. Pour éviter cette désagréable surprise, c'est avant l'enquête qu'il faut s'en préoccuper. Comment peut-on assurer une certaine représentativité aux données que l'on va collecter ? Comme il n'y a pas de connaissance exhaustive possible, il faut effectuer un choix. Effectuer un choix revient à sélectionner un échantillon de paysage, donc à déterminer un critère objectif qui permette sans ambiguïté de retenir ou de rejeter un individu vis-à-vis de l'échantillon que l'on constitue.

Ce critère peut être subjectif, lié aux connaissances de l'opérateur, ou objectif, indépendant de l'enquêteur comme peut l'être le hasard. Notons que celui-ci est loin de signifier "n'importe comment".

L'inconvénient de la méthode subjective réside dans l'absence de moyen de contrôle de la représentativité de l'échantillon vis-à-vis de la zone d'étude. De plus,

il est difficile de reproduire ce type d'échantillonnage. En effet, deux enquêteurs successifs n'effectueront pas les mêmes observations, car leur perception du milieu est différente, et alors ils risquent fort d'obtenir des résultats sensiblement différents. Cet échantillonnage est donc à proscrire, on lui préférera une méthode moins tributaire de la subjectivité de l'enquêteur.

Notre manque de connaissances, a priori, des zones d'enquête et les remarques précédemment formulées ont fait que nous nous sommes tourné vers un critère de sélection de l'échantillon étranger à notre subjectivité. Notre choix s'est porté sur des méthodes de sondage aléatoires et aréolaires.

Aléatoire pour bénéficier de méthodes statistiques qui permettent l'estimation de la superficie des postes d'occupation du sol, mais aussi le calcul de la précision qui lui est attachée et cela grâce à l'introduction du hasard dans la procédure de tirage de l'échantillon.

Aréolaire, car contrairement au milieu agricole où il est possible de dresser des listes d'exploitants, par exemple, pour effectuer ce tirage, en milieu naturel rien de tel n'existe, à plus forte raison en milieu sahélien. Il faut donc se constituer sa propre liste. Le plus simple, est de recourir à des documents qui prennent en compte l'espace (cartes, photographies, images satellite, etc.), le découper en mailles et sélectionner celles qui vont constituer l'échantillon (cf. 6.1.). Cette liste est appelée la base de sondage.

Dans la mesure où notre connaissance du milieu n'est pas exhaustive mais simplement représentative, il faut que nous trouvions un moyen qui nous permette de passer de l'échantillon au terroir agropastoral. Le seul qui soit fiable et précis tient justement au tirage aléatoire.

En effet, grâce au tirage aléatoire, nous disposons de tout un cortège de lois statistiques nous permettant d'extrapoler les résultats de l'enquête, de l'échantillon à la zone d'étude (cf. 4.3.). Les échantillons non probabilistes ne peuvent évidemment pas en bénéficier. Seuls les tirages probabilistes permettent d'estimer la superficie ou la production de certains paramètres au niveau de l'échantillon puis d'en tirer des lois valables pour l'ensemble du domaine étudié.

De même, l'échantillonnage probabiliste va fiabiliser la procédure dite par "zones d'égal raisonnement" qui permet la représentation spatiale au niveau de la zone d'étude des thèmes inventoriés sur l'échantillon. Cette procédure, basée sur une notion d'analogie visuelle, topographique, radiométrique ou autre, permet de caractériser tous les objets de la zone d'étude présentant des similitudes avec l'individu considéré dans l'échantillon.

Donc en plus de l'enquête de terrain, il est indispensable de disposer d'une base de sondage pour pouvoir passer de l'échantillon à l'ensemble de la zone d'étude. Nous allons voir maintenant de quel type de base de sondage nous disposons et son intérêt.

4.1.2. La base de sondage

Qu'est-ce qu'une base de sondage ? C'est, dans notre cas, un document géographique qui contient toute la zone d'étude sans omissions ni doubles comptes et sur lequel il est possible de tirer un échantillon compatible avec les renseignements recherchés. Quels sont les documents géographiques disponibles pour remplir ce rôle ?

Trois documents sont théoriquement susceptibles de satisfaire aux exigences sus-mentionnées. Ils s'agit des cartes topographiques, des photographies aériennes et des prises de vue satellitaires. Comme nous allons le voir, il n'y a pratiquement que les données de télédétection qui soient utilisables sur nos zones d'études.

4.1.2.1. Une documentation obsolète

En raison des orientations prises pour tester cette méthode, l'échelle des documents concernés pour l'élaboration du plan de sondage doit prendre en compte une superficie de 20 km sur 20 km, de ce fait le document cartographique de base pour l'Afrique de l'ouest n'est déjà plus adapté. En effet sur une coupure à 1/200 000, la zone d'étude ne représente qu'un carré peu détaillé de 10 cm de côté. Pour des études analogues, le SCEES recommande, en France, des coupures cartographiques à 1/100 000 et des tirages photographiques à 1/25 000¹. Il nous faut donc détailler par zone d'étude la documentation dont nous disposons, et vérifier si elle est adaptée à notre problématique.

L'Institut Géographique National français (IGN) a assuré en Mauritanie, comme pour l'ensemble de l'Afrique de l'ouest, la couverture cartographique de base au 1/200 000. La majeure partie de cette couverture date de la fin des années cinquante. Certaines coupures sont moins anciennes, mais seule la planimétrie a été reprise car aucune mission aérienne récente et complète n'a permis une réelle mise à jour.

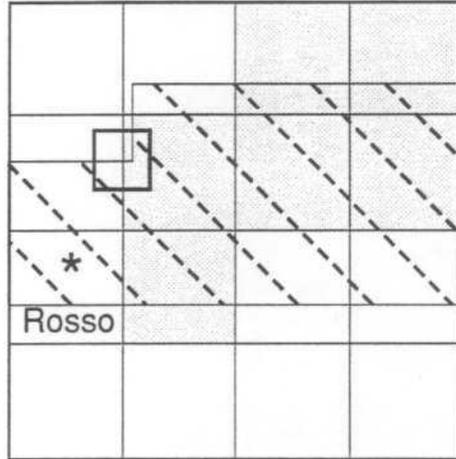
¹FOURNIER 1986 p.21

figure 4.1 - Documentation cartographique et photographique disponible à l'IGN

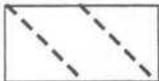
Caractéristiques des couvertures aériennes et des fonds topographiques disponibles par coupure à 1/200 000

Nom et réf.
des feuilles
à 1/200 000

DAGANNA
NE-28-III

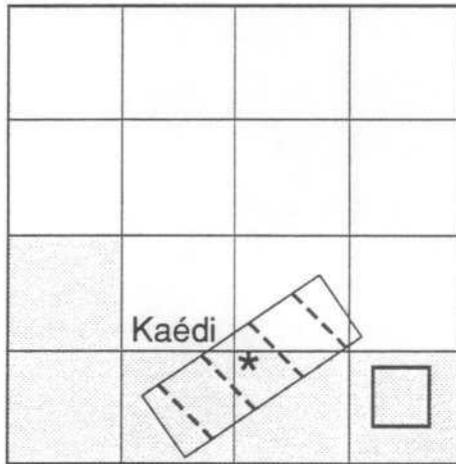


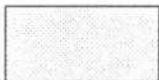

cartes à 1/50 000


photos à 1/50 000
SEN 1976 23/500


zone pilote de Rosso

KAEDI
NE-28-V

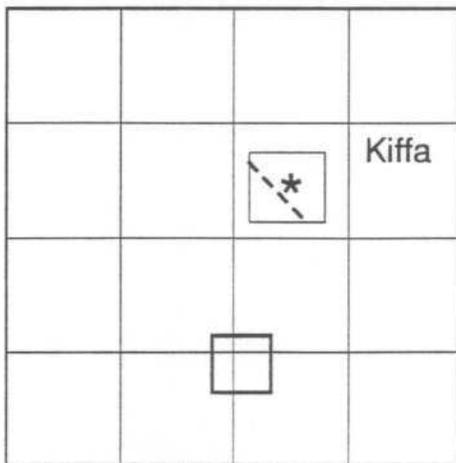


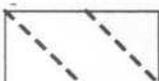

cartes à 1/50 000


photos à 1/15 000
1984 MAU 9/150


zone pilote de Lekseïba

KIFFA
NE-29-I




photos à 1/15 000
1984 MAU 8/150


zone pilote des oasis

Le long du fleuve Sénégal quelques feuilles à 1/50 000 ont été éditées. Elles datent des années 56-57. Seul le secteur d'étude de Lekseïba est intégralement couvert par ces coupures. Celui de Rosso n'a que sa partie Est prise en compte (cf. fig. 4.1). Bien évidemment les palmeraies de l'Assaba ne sont pas concernées.

Il n'est donc pas possible d'utiliser la cartographie topographique existante pour servir de base de sondage, en raison de son ancienneté, du fait qu'elle est incomplète ou que l'échelle de publication n'est pas adaptée. Qu'en est-il de la photographie aérienne ?

Rappelons que depuis une trentaine d'années, la photographie aérienne est l'outil privilégié des inventaires agricoles, en particulier en milieu tempéré. Pour la France, les premiers essais réalisés par le SCEES remontent à 1962. Il faut toutefois attendre 1969 pour que la photographie serve de base de sondage dans l'enquête d'utilisation du territoire (TER-UTI) pour l'ensemble du pays¹. De même, les Etats Unis qui avaient entamé des recherches sur une méthodologie très proche en 1954 ne sont passés à la phase opérationnelle, à l'échelle de leur pays il est vrai, qu'en 1967². Ces méthodes d'enquête utilisant la photographie aérienne comme base de sondage ont donc une trentaine d'années environ et sont parfaitement rodées.

Nous allons maintenant brièvement énumérer les couvertures aériennes dont nous pouvons disposer pour cette étude. Il s'agit de missions exclusivement réalisées par l'IGN. En effet, bien qu'ayant eu connaissance de prises de vue réalisées pour le compte de l'Office de Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS), nous n'avons jamais pu nous procurer autre chose qu'une copie du plan de vol. Les photographies aériennes décrites ici sont donc toutes à mettre au crédit de l'IGN.

En dehors de la couverture générale, déjà citée, couvrant l'ensemble du territoire en "panchromatique" (noir et blanc) à 1/50 000 et datant du milieu des années cinquante, il n'y a pas d'unité entre les zones. Chacune est un cas particulier.

Le secteur de Rosso est le plus favorisé de tous car il comporte deux autres couvertures aériennes relativement récentes, toutes deux d'avril 1976. L'une est à 1/50 000 et l'autre à 1/12 500. Elles ont été prises lors des études concernant le barrage de Diama. Elles longent le fleuve et ne pénètrent pas très avant dans les terres. Seul le 1/50 000 couvre presque intégralement le terroir agropastoral étudié (cf. zone pilote fig. 4.1) alors que le 1/12 500 s'arrête plus au sud et n'a d'ailleurs pas été représenté sur la figure.

¹FOURNIER 1972 p.8

²MEYER-ROUX 1981a p.13

Le secteur de Lekseïba est trop à l'Est de la mission de 1984 centrée sur Kaédi (ref. MAU. 1984 9/150), il n'est donc couvert que par la mission globale de 1954, tout comme celui des oasis. Si l'on peut admettre que quelques années séparant une prise de vue de son utilisation n'altèrent pas trop la relation les unissant, qu'en est-il, lorsqu'il s'agit de plus d'une dizaine d'années dans le cas de Rosso, voire d'une trentaine pour les deux autres secteurs ?

L'obsolescence de la couverture cartographique et photographique nous a donc contraint de rechercher du côté de la télédétection le document qui pourrait servir de base de sondage.

4.1.2.2. *L'imagerie satellitaire*

La télédétection a supplanté dans de nombreux domaines la photographie aérienne par absence ou obsolescence de cette dernière, principalement en milieu sahélien comme cela a été établi précédemment. En raison de sa résolution, le seul domaine où la photographie aérienne conserve un net avantage sur la télédétection est celui des études à très grande échelle. Encore faut-il disposer de prises de vue.

En l'absence d'une nécessité impérieuse d'effectuer des études à grande échelle la télédétection offre de nombreux avantages, en voici quelques-uns.

La répétitivité : la plupart des satellites repassent au-dessus du même point en moins de 30 jours, et cela pour les moins fréquents. Ils assurent donc un minimum de 12 couvertures théoriques possibles par an.

Le moindre coût : est lié au fait que les satellites tournent en permanence et pour de nombreux utilisateurs. Ceux-ci n'achètent que les enregistrements qui leur conviennent, contrairement aux missions aériennes qui sont facturées que la prise de vue ait eu lieu ou non (problème d'intempéries, etc.).

La quantification de certaines variables continues : cette quantification est pratiquement irréalisable sur photographies aériennes pour des variables comme la quantité de matière sèche d'un pâturage ou le rendement en blé d'une parcelle. Ceci est dû à la disparité qualitative qui existe entre deux photos, en raison de l'instabilité des émulsions, de l'évolution des bains de développement, etc. En revanche, sur un enregistrement numérique provenant d'imagerie satellitaire et avec une échelle adéquate (cf. *infra*), il existe une homogénéité radiométrique sur l'ensemble de la

zone d'étude qui permet, par exemple, la quantification de la "phytomasse herbacée aérienne"¹ (une partie du fourrage) ou celle des rendements en blé².

Amélioration de la localisation : la possibilité de mettre facilement en géométrie un document satellitaire avec un document cartographique dont le référentiel est connu, permet d'utiliser des localisateurs satellitaires pour se diriger sur le terrain, mais aussi pour positionner, avec une précision connue, les relevés de terrain dans la base de sondage.

Enfin, il n'est pas nécessaire, comme avec la photographie aérienne, d'avoir une longue expérience en photo-interprétation pour cartographier les résultats d'inventaire de l'enquête d'occupation du sol. Les algorithmes utilisés lors des traitements vont, grâce à la "bonne" représentativité de l'enquête de terrain et à la finesse de résolution du satellite, réaliser cette cartographie. Sa qualité dépendra, bien sûr, de l'enquête de terrain mais aussi de l'enregistrement satellitaire, or tous les capteurs ne sont pas équivalents pour réaliser un inventaire d'occupation du sol.

Quatre capteurs étaient à notre disposition pour réaliser cette étude. Par ordre croissant de résolution (taille de la tache élémentaire, le pixel) il s'agit de l'AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), de Landsat MSS (MultiSpectral Scanner), de Landsat TM (Thematic Mapper) et enfin de l'HRV (Haute Résolution dans le Visible) de SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) que nous appellerons plus simplement SPOT.

Les capteurs à large champ et haute répétitivité du type AVHRR embarqué sur NOAA ne sont pas adaptés à l'étude de terroirs sahéliens, sous un angle occupation du sol, avec leurs pixels avoisinant un kilomètre de côté en résolution maximale. Leur utilisation actuelle est plus tournée vers l'évaluation, à un niveau régional, de l'état de la végétation, que vers une quantification de celle-ci. On parle de faible résolution lorsque la tache élémentaire (pixel) enregistrée par le capteur représente une grande surface. AVHRR est un capteur de ce type, suivant le mode d'enregistrement, son pixel peut avoir un ou quatre kilomètres de côté. Ce capteur est donc relativement incompatible avec nos préoccupations.

Avec Landsat MSS, nous entrons dans la série des satellites dont la résolution est susceptible de satisfaire aux besoins des enquêtes d'inventaire. En effet le pixel d'une scène MSS est un rectangle d'environ 80 m par 60 m de côté, il a donc moins tendance que AVHRR à agglomérer des paysages hétérogènes. Sa meilleure résolution se traduit aussi par un champ de prise de vue plus étroit, 185 contre 2 700 km. De même sa répétitivité est plus faible, une prise de vue en un peu moins de 20

¹DE WISPELAERE 1988

²BOISSARD 1988

jours, contre plusieurs par jour pour AVHRR (toutes ne sont pas exploitables dans notre domaine, enregistrements nocturnes, etc.). Si MSS n'est pas adapté à un suivi "agrométéorologique" de la végétation comme peut l'être AVHRR, en revanche ses spécificités géométriques lui permettent un suivi de la plupart des couverts végétaux sahéliens.

Nous avons dû toutefois renoncer à l'utiliser comme base de sondage en raison d'une résolution un peu faible en regard de certains postes d'occupation du sol, telles les cultures du "diéri" (terme halpoular désignant les terres sur la bordure extérieure des vallées alluviales). Celles-ci seraient cultivées sur des parcelles de 0,4 ha en moyenne, tout du moins pour la région du Gorgol (chiffre communiqué par un enquêteur du bureau des statistiques agricoles mauritaniennes). Or avec un pixel d'environ 0,5 ha (80 m * 60 m) MSS n'est pas adapté au parcellaire des cultures d'hivernage. Cette conclusion a été formulée¹ à l'issue des traitements portant sur les données collectées lors de la mission de novembre 1985. L'équipe ayant en charge le projet avait alors recherché un capteur prenant en compte ce paramètre supplémentaire.

Le troisième capteur, Landsat TM, a des spécificités très proches de celles de MSS. Les seules différences notables sont de trois types. Ce capteur est doté de sept canaux d'enregistrement dans le spectre électromagnétique contre quatre seulement pour MSS. Sa résolution est plus fine, le pixel TM est un carré de 30 m sur 30 m. Enfin, il est nécessaire de programmer son fonctionnement pour acquérir des enregistrements, à moins que d'autres ne l'aient fait par ailleurs, auquel cas ces produits se retrouveront au catalogue après un temps plus ou moins bref.

Cependant, malgré une résolution compatible avec les spéculations agricoles de la région, il tient en théorie quatre pixels TM dans une parcelle moyenne de 0,4 ha, nous avons préféré, comme beaucoup d'autres organismes à la même époque, tester le satellite SPOT qui venait d'être lancé. Une raison très pragmatique a, pour nous, guidé ce choix. Il n'y avait pas d'enregistrement TM disponible au catalogue (été 1987) sur l'Afrique de l'Ouest lorsque l'on a préparé cette étude et l'on ne savait pas quand la station réceptrice de Mas Palomas allait être opérationnelle. SPOT offrait donc à priori plus de perspectives.

De plus, SPOT possède une résolution légèrement supérieure à TM, 20 m en mode multibande (XS) et 10 m en mode panchromatique (P). Dans la mesure où un des volets de l'étude devait se dérouler dans les palmeraies de l'Assaba, le gain de résolution attendu pour l'inventaire en milieu agro-oasien a été un argument supplémentaire en faveur de SPOT. Tout comme la possibilité de "dépointer" ses objectifs de part et d'autre de sa "trace" au sol. Ainsi, alors que sa révolution

¹DE WISPELAERE 1987 p.20

complète est de 26 jours, il peut enregistrer plusieurs jours de suite la même portion de territoire.

La documentation technique¹ de SPOT indique que grâce aux possibilités de visée latérale ($\pm 27^\circ$ par rapport à la verticale) le capteur HRV peut observer une fenêtre de 60 à 80 km de large, suivant l'angle de prise de vue, dans une bande de 950 km centrée sur la verticale de la trace. Il en découle deux particularités. Au cours de sa révolution, SPOT aura une possibilité théorique de sept enregistrements de la même portion de territoire à l'équateur et de 11 à une latitude de 45° . Ce dépointage permet également la vision du relief en consultant une même scène prise sous deux angles différents.

Si l'on exclut MSS pour la faiblesse de sa résolution, SPOT semble encore être actuellement le meilleur choix quant à la répétitivité et donc au nombre des prises de vue disponibles sur le catalogue des distributeurs pour constituer une base de sondage sur nos secteurs d'étude (cf. tab. 4.1). Cette analyse mensuelle doit être considérée comme un exemple car elle a été réalisée postérieurement à l'étude.

tableau 4.1 - Possibilités mensuelles d'images

	MSS	TM	SPOT
Rosso	0,8	0,25	0,5
Lekseïba	0,6	0,3	0,5
Kiffa	0,7	0,25	0,2

Calculs effectués sur une période allant d'août à novembre, de 1987 à 1989 pour MSS et TM et de 1986 à 1989 pour SPOT. Sources GDTA et SPOT Image.

On trouvera en Annexe 1, un tableau regroupant l'ensemble des prises de vue de fin de saison des pluies pour les trois secteurs d'étude, cela en fonction des capteurs et de la couverture nuageuse (cf. tab. A.1.1). Il permet ainsi de mesurer les possibilités de choix pour sélectionner une base de sondage pour réaliser l'inventaire.

De même, pour des zones d'étude de faible superficie comme les terroirs agropastoraux précédemment définis, le coût d'une scène SPOT était encore récemment (au moins jusqu'en septembre 1990) nettement inférieur à celui d'une scène TM (cf. tab. A.1.2). Rappelons qu'une scène SPOT ne couvre que le neuvième d'une scène TM, soit un carré d'environ 60 km de côté contre 185 km pour TM. De même, les spécificités radiométriques de SPOT sont plus restreintes que celles de son concurrent dans la mesure où son capteur n'enregistre que trois fenêtres dans le spectre électromagnétique contre sept pour TM.

¹SPOT 1986

Donc lorsque la phase d'inventaire a commencé, en septembre 1987, il nous a semblé que les documents satellitaires SPOT étaient les plus à même de servir de base de sondage. Ils ont donc été retenus pour les trois zones d'étude pour positionner l'échantillon puis après le retour de mission pour réaliser les traitements.

En règle générale, les documents cartographiques et photographiques, quels qu'ils soient, permettent une description qualitative du paysage. Cela va de la détermination des différents thèmes à l'évaluation de leur superficie. Les documents numériques satellitaires, en revanche, permettent de quantifier certains paramètres, telle la quantité de biomasse. Ce critère a guidé notre choix pour sélectionner l'élément central de la base de sondage : les données numériques issues d'imagerie satellitaire. Ensuite, ce sont la résolution, la disponibilité et le coût des différents capteurs qui nous ont fait opter pour les produits SPOT.

Bien que cela n'ait pas été possible dans notre cas, il nous semble souhaitable de disposer en plus du document numérique, qui reste l'élément central de la base de sondage, de données exogènes (photographies aériennes, cartes, etc.) pour ne pas dépendre d'une seule source documentaire.

En conclusion de cette section, on peut dire qu'un inventaire d'occupation du sol ne requiert pas une connaissance exhaustive de la zone d'enquête. A l'échelle d'un terroir d'agro-éleveurs, celle-ci est de toute façon illusoire ou hors de proportion avec le temps qu'il est possible de lui consacrer. Une bonne représentativité de l'ensemble des composantes du paysage doit permettre de répondre à la majorité des questions qui ont suscité la mise en place de l'inventaire.

Le satellite SPOT a été sélectionné pour fournir le document qui servira de base de sondage et celui qui servira lors des traitements nécessaires au dépouillement de l'inventaire. Il faut maintenant voir quelles sont les techniques d'échantillonnage qui permettent d'assurer cette représentativité et comment elles valorisent l'imagerie satellitaire.

4.2. CHOIX D'UNE MÉTHODE DE SONDAGE

La plupart des méthodes de sondages spatiaux sont antérieures à la télédétection, elles ont dans une large mesure été mises au point pour la photographie aérienne. Puis, en fonction des besoins ou de l'intérêt, certaines ont été adaptées à l'imagerie satellitaire. Lorsqu'elles ont été testées sur ce nouveau support, elles ont bénéficié d'une source documentaire extérieure permettant d'étalonner la méthodologie et les résultats.

Il faut cependant noter qu'il y a eu très peu d'essais de ce type en milieu naturel tropical. L'absence de documentation de contrôle en est, pour partie, la cause. Nous avons déjà évoqué la vétusté des couvertures aériennes sur le Sahel mauritanien. Il nous reste à préciser qu'il n'y a pas eu à notre connaissance d'enquête, agricole ou autre, exploitable pour notre recherche. On comprendra alors aisément que, d'une part toute méthode d'enquête aréolaire fiable sera la bienvenue et que d'autre part elle devra être robuste et avoir été testée par ailleurs en raison de l'absence de moyen de contrôle.

Les enquêtes effectuées par le bureau des statistiques agricoles du Ministère du Développement Rural mauritanien sont des tirages sur listes où l'on échantillonne sur les exploitants et pas sur les surfaces cultivées. Elles ne renseignent donc pas sur l'extension spatiale d'une culture mais sur son importance par entité administrative. Elles ne nous ont été d'aucune utilité, car ne recoupant pas les limites de notre étude.

Nous ne disposions donc pour effectuer notre étude d'inventaire que d'imageries satellitaires. Il fallait de ce fait sélectionner une méthode de sondage éprouvée et portant en elle les moyens d'évaluer sa qualité. Bien qu'il ne soit pas question de passer en revue toutes les méthodes de sondages aréolaires, nous avons essayé d'en décrire brièvement les principales. Nous justifions aussi le choix de celle que nous avons retenue.

Nous avons subdivisé ces méthodes en deux grands types, en fonction des résultats que l'on peut en attendre. Il s'agit d'une part des sondages empiriques, ou non probabilistes, et d'autre part des sondages aléatoires, ou probabilistes.

4.2.1. Échantillonnages empiriques

Les sondages par "choix raisonné" et par "la méthode des itinéraires" sont pour J. Desabie¹ les deux principales méthodes empiriques d'échantillonnage.

La procédure par choix raisonné veut que l'on s'en remette à ses propres connaissances pour sélectionner les éléments représentatifs du paysage. Cette procédure n'implique pas que l'on connaisse déjà la zone d'étude, mais elle suppose que le milieu bioclimatique soit familier à l'enquêteur. Celui-ci en fonction de ses connaissances du terrain décidera de sélectionner dans son échantillon telle unité d'observation plutôt que telle autre, car il ne l'a pas encore rencontrée, ou bien

¹DESABIE 1966 : 44-63

encore, car c'est une variante intéressante d'un faciès déjà retenu. Les sondages par choix raisonné constituent un échantillon d'individus appelés "unités types".

La procédure la plus fréquemment retenue pour échantillonner les unités d'observation, en milieu sahélien, consiste à combiner la méthode des itinéraires et celle des unités types (cf. 5.1.). Un certain nombre d'itinéraires sont déterminés en fonction des pistes existantes et du fait qu'elles passent dans des paysages variés d'un point de vue géomorphologique, pédologique, etc. Puis, l'ensemble des faciès rencontrés le long de l'itinéraire est observé et quelques unités types, représentatives des paysages traversés, sont sélectionnées.

Une unité type est une unité d'observation dont les caractéristiques sont une moyenne de celles du paysage traversé. Ce caractère moyen est difficile à évaluer sur l'ensemble du secteur d'étude, il vaut mieux l'évaluer par paysage, autrement dit par strate. On aura tout intérêt à réaliser la stratification sur des documents satellitaires numériques antérieurs à la mission de terrain (cf. 7.1.). Cette stratification assurera la meilleure dispersion thématique possible de l'échantillon, surtout si, comme le conseillent Ph. Fournier et J.P. Gilg¹, on enquête, en dehors de toutes contraintes de temps, moyen de transport, etc., **un minimum de deux unités par strates et que chaque thème est représenté par au moins trois parcelles distinctes.**

Cependant, cet échantillonnage par choix raisonné, même amélioré par une stratification, n'assure pas la représentativité et l'objectivité d'un échantillonnage probabiliste. La sélection de l'unité d'observation est laissée à l'appréciation du thématicien, donc de ses impressions de terrain. Le risque de sur ou sous-représenter certains thèmes existe, il est inhérent aux conditions de subjectivité dans lesquelles se déroule l'enquête.

Dans la mesure où l'échantillonnage n'est pas probabiliste, il n'existe pas de lois statistiques pour passer d'une estimation (superficie, production, etc.) au niveau de l'échantillon à une estimation au niveau de la zone pilote. Si l'on souhaite des statistiques d'occupation du sol, c'est bien souvent la cartographie, issue du traitement des données satellitaires, qui fournit les superficies des différentes classes inventoriées.

Or, J. Meyer-Roux² écrit que "*l'estimation de la surface d'une catégorie d'utilisation du sol pour un territoire donné, par la télédétection, est généralement biaisée.*" et que "*des vérités terrain permettent cependant d'apprécier ce biais et de redresser la statistique.*". Encore faut-il que le tirage des échantillons de terrain ne soit pas lui même biaisé. Seul un tirage aléatoire des unités d'observation peut nous

¹FOURNIER 1985a p.9

²MEYER-ROUX 1981b p.11

permettre de calculer ce biais, donc l'erreur d'échantillonnage et de ce fait les superficies des différents postes d'occupation du sol. Toute autre méthode ne peut fournir qu'une estimation grossière¹.

En conséquence, comme il n'est pas possible d'estimer les erreurs de traitement, **toute statistique d'occupation du sol obtenue d'après une cartographie issue d'un échantillonnage empirique n'a qu'une valeur indicative.** Baser un programme de développement sur ce type de données nous semble très dangereux.

En revanche la souplesse de mise en place de ce type de méthode en fait un outil de pré-enquête très peu coûteux en temps comme en argent pour des performances satisfaisantes. Le dénombrement des différentes classes d'occupation du sol, une première approximation de leur importance respective, la réalisation d'une stratification en fonction de leur répartition spatiale, etc. sont la justification des méthodes empiriques en milieu naturel sahélien, ou autre, pour les inventaires d'occupation du sol.

4.2.2. Échantillonnages probabilistes

Dans la mesure où :

- on est confronté à un inventaire d'occupation du sol mais qu'il a dépassé la phase de pré-enquête, ou qu'elle n'est pas prévue ;
- on souhaite réaliser une cartographie dont le biais doit être évalué ;
- on veut disposer de statistiques d'occupation du sol pour lesquelles la précision doit être estimée, voire améliorée ;
- enfin, on souhaite que l'absence d'éléments subjectifs dans son échantillonnage confère à celui-ci une crédibilité et une valeur scientifique certaine.

Alors, il faut renoncer aux méthodes empiriques et opter pour une méthode aléatoire. Car grâce aux échantillons probabilistes "*... pour chaque unité des populations concernées on est capable de contrôler la probabilité d'appartenance à l'échantillon, et donc de calculer explicitement les biais et variances imputables à l'échantillonnage.*"². Pour peu qu'on dispose d'un peu de temps de préparation et

¹BRION 1982 p.32

²GROSBRAS 1987 p.241

d'enquête, les sondages de type aléatoire sont une solution moins compliquée qu'on ne l'imagine à mettre en oeuvre et à exploiter.

Les méthodes de sondages probabilistes comportent toutefois des inconvénients. L.M. Asselin¹ en relève trois, liés au coût, à la durée et à la taille de l'échantillon. En effet, ce type de sondages est plus long et plus coûteux à réaliser que les sondages empiriques car il suit des modèles mathématiques relativement contraignants, essentiellement sur le plan de la sélection de l'échantillon. Enfin, il est soumis à la loi des grands nombres. L'erreur d'échantillonnage ne peut diminuer qu'avec l'accroissement de la taille de l'échantillon. Remarquons que la précision croît d'un facteur " \sqrt{n} " quand l'échantillon est lui-même multiplié par " n "².

4.2.2.1. *Formes de l'unité d'observation*

Ph. Fournier et J.P. Gilg³ ont démontré l'importance que revêt la forme de l'unité d'échantillonnage lors d'inventaires réalisés conjointement avec la télédétection. Leurs recherches ont permis de sélectionner la forme d'unité la plus appropriée pour des opérations d'inventaire d'occupation du sol en milieu naturel, dans le but d'utiliser la télédétection de manière optimale.

Dans les sondages aréolaires, trois formes de base sont envisageables. L'unité d'observation peut être : **ponctuelle, linéaire ou surfacique.**

- Les unités d'observation ponctuelles

Sous ce vocable sont regroupées les enquêtes par points, comme les méthodes par **placettes** et par **points** du ministère français de l'agriculture. On trouvera une description des enquêtes par placettes auprès des services de l'Inventaire Forestier National⁴ (IFN) et une description des enquêtes par points auprès du Service Central des Enquêtes et Études Statistiques⁵ (SCEES).

Ces deux méthodes de sondages sont pratiqués sur photographies aériennes, mais ce n'est pas l'absence de tels documents pour nos zones d'étude qui fait que nous ne les avons pas retenues. Il semble d'après Ph. Fournier et J.P. Gilg⁶ que le tirage

¹ASSELIN 1984 p.16

²ASSELIN 1984 p.32

³FOURNIER 1985a

⁴IFN 1985

⁵FOURNIER 1972

⁶FOURNIER 1985a p.11

par points ne soit pas la méthode la plus adéquate pour affecter un relevé de terrain aux données satellitaires qui lui correspondent. Cela tient aux difficultés qu'il y a à repérer un point dans la géométrie satellitaire et à l'affecter à un pixel de façon fiable. Il est donc préférable de nous tourner vers d'autres formes d'unités d'observation. De plus ces méthodes complexes ne peuvent être confiées qu'à des services hautement spécialisés. Ce n'est pas toujours possible ni souhaitable lorsque l'on envisage un transfert de technologie.

- Les unités d'observations linéaires

Les unités d'observations linéaires sont aussi appelées enquêtes par transect, elles diffèrent des itinéraires décrits lors des sondages empiriques par le fait que les points de départ et d'arrivée sont tirés au hasard. Elles permettent aussi de calculer la proportion de chacun des postes d'occupation du sol en fonction de la distance totale parcourue et de celle réalisée dans la catégorie considérée.

Cette méthode est rarement utilisée en tant que telle, car pas plus que pour les méthodes ponctuelles, il n'est aisé d'associer de manière rigoureuse un transect et sa ligne de pixels. Le transect est parfois utilisé pour cheminer de manière aléatoire et implanter des unités d'observation de manière systématique comme dans certains inventaires forestiers¹. Celles-ci ont alors parfois une taille suffisante pour être matérialisées sur l'imagerie satellitaire.

- Les unités d'observations surfaciques

Les enquêtes par unité d'observation surfacique sont aussi appelées enquêtes par segments. Deux types de segments sont utilisés, les segments de forme quelconque et les segments de forme géométrique simple.

Les enquêtes par segment de forme quelconque ont été développées aux Etats-Unis pour les besoins des statistiques agricoles. Chaque segment est un ensemble de parcelles jointives, il est délimité par des routes, rivières, etc. Dans l'échantillonnage aréolaire, la base de sondage est constituée par ces parcelles jointives groupées en segments. Ce sont ces segments qui sont échantillonnés².

Le tirage des segments est à probabilité égale, dans la mesure où le découpage de l'univers (la base de sondage, c'est-à-dire le paysage) est effectué en segments de

¹NASI 1988 p.28

²MEYER-ROUX 1981a p.13

taille à peu près analogue. C'est aussi un paramètre que E.E. Houseman¹, un des initiateurs de ce type de sondage, conseille de respecter pour réduire la variance d'échantillonnage entre segments.

Or, ce découpage indispensable de l'univers s'avère souvent long et fastidieux. En milieu naturel, les limites peuvent être difficilement repérables. Malgré une bonne adéquation avec la télédétection, **l'usage du segment de forme quelconque en milieu naturel est déconseillé²**.

Il est beaucoup plus aisé de recourir en milieu naturel, tropical de surcroît, aux segments géométriques de formes simples. Le **segment carré** est probablement la forme optimale pour l'implantation et l'investigation sur les documents et le terrain. En effet, le découpage de l'ensemble de la zone d'étude par un maillage régulier, sur l'image satellite, fournit une population de carrés tous identiques (les segments). Ensuite, par tirage équiprobable, il ne reste plus qu'à constituer l'échantillon. Aucune connaissance préalable du milieu n'est nécessaire pour réaliser le découpage puis le tirage.

La taille du segment est variable, elle représente un nombre important de pixels. Dans les faits, cela se traduit par la présence de plusieurs catégories d'occupation du sol par segment, c'est un des avantages de la méthode surfacique par rapport aux tirages ponctuels et linéaires. Cet avantage se traduit par les aspects suivants :

- l'extension spatiale de chaque classe d'occupation du sol est connue et continue sur les segments ;
- il est assez aisé d'affecter, après enquête, à un groupe de pixels la classe d'occupation du sol qui lui correspond, il est même possible d'estimer la précision de cette affectation (cf. 6.2.1.) ;
- d'autres paramètres que l'état de surface (si l'on dispose des renseignements) peuvent être enquêtés sur les segments, telles les fractions nomadisant sur le secteur ou bien encore le bétail réellement présent lors de l'enquête, etc. ;
- bien qu'une stratification morphologique même grossière puisse apporter des améliorations intéressantes (cf. 7.1.1.), la méthode n'en est pas tributaire pour être efficace ;

¹HOUSEMAN 1979 p.13

²FOURNIER 1985a p.16

- lorsqu'une stratification morphologique est utilisée, la variabilité intra et inter-strates s'étudie aisément en comparant la proportion de chaque thème sur les segments d'une même strate puis entre strates ;
- comme tous les segments ont la même superficie, l'extrapolation des superficies se fait en toute rigueur par équiprobabilité ;
- la précision de l'estimateur de superficie peut être aisément améliorée par des techniques simples et efficaces (cf. 4.3.1.) ;
- enfin, enquêter des thèmes jointifs sur le terrain permet d'améliorer le rapport temps d'enquête sur temps de liaison, rapport qui est moins favorable pour les enquêtes par points, à l'exception des tirages en grappes.

Les très nombreux avantages qui caractérisent les méthodes d'enquête surfaciques et en particulier celle des segments carrés ne sont pas contrebalancés par une série trop importante d'inconvénients. A notre avis, il n'y en a que deux dont l'importance nécessite qu'ils soient exposés ici.

En premier lieu, il faut noter qu'il est indispensable de calculer segment par segment la superficie de chaque catégorie d'occupation du sol. Contrairement à la procédure utilisée en milieu agricole où les parcelles sont individuellement identifiables, il n'est pas possible, à la suite de la mission de terrain de tracer sur le document d'enquête les limites des différents thèmes, puis d'en mesurer l'extension¹. Il faut envisager d'autres méthodes d'estimation des superficies (cf. 7.3.).

Enfin, et c'est le point qui pose le plus de problèmes, la taille du segment n'est pas réellement définie². En secteur agricole, milieu pour lequel cette procédure a été développée, la taille du segment est calée sur celle d'une exploitation agricole moyenne. Dans les grandes plaines du Kansas et de l'Iowa, le segment représente environ un mile carré³, soit à peu près 2,6 km² (260 ha). En Ardèche⁴, trois tailles de segment ont été retenues (25, 50 et 75 ha) en fonction de celle du parcellaire.

En revanche, **en milieu naturel, tropical ou non, il n'y a pas de repère pour caler la taille du segment.** Il a donc été nécessaire de tester quelques descripteurs du milieu pour qu'avant le départ et en l'absence de tout renseignement, il soit possible de déterminer une taille optimale d'enquête pour les segments carrés (cf. 7.2.).

¹FOURNIER 1986 : 24-27

²FOURNIER 1985a p.16

³MEYER-ROUX 1981b p.13

⁴TOUZELET 1983 p.11

Il ressort de ce résumé des différentes méthodes d'échantillonnage, que le segment carré s'adapte très bien à l'usage conjoint de la télédétection et de l'enquête de terrain, malgré quelques problèmes laissés en suspens pour le moment. C'est donc cette procédure qui a été retenue pour être testée en milieu naturel tropical.

Nous verrons plus loin que, bien que la méthode d'enquête soit de type surfacique, certains aspects des prélèvements, coupes de biomasse par exemple, tendent à lui donner un aspect ponctuel.

Au cours de ce descriptif des principales méthodes d'échantillonnage, il a été question de différentes méthodes de tirage. Nous allons déterminer quelle est celle qui s'adapte le mieux à notre problématique.

4.2.2.2. *Sélection d'un mode de tirage*

Le sondage aléatoire détermine l'appartenance d'une unité d'observation à un échantillon, non pas en fonction de son intérêt mais en fonction d'un tirage au hasard dont la loi de probabilité est connue. Ce mode de tirage permet d'évacuer la subjectivité de l'enquêteur. Il est possible de recourir à deux grandes familles de tirages aléatoires : les tirages aléatoires "élémentaires" et les tirages systématiques.

J. Desabie¹ assimile le sondage systématique à un sondage aléatoire à condition que la base de progression arithmétique soit effectivement tirée au sort et que la répartition des objets inventoriés ne représente pas de structures particulières. Dès lors, le calcul des différents estimateurs est facilité par l'utilisation du formulaire usuel des sondages aléatoires "élémentaires"². Le biais entraîné par cet artifice de calcul est une surestimation de l'estimateur de la variance³.

- Le tirage aléatoire "élémentaire"

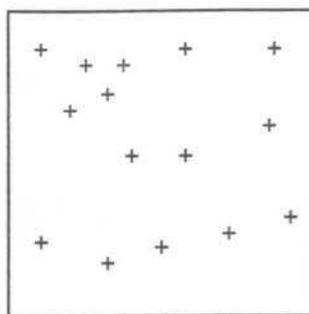
Cette méthode consiste à tirer aléatoirement les coordonnées de m unités d'observation sur M , population totale de la zone d'étude, de telle façon que chaque unité d'observation ait une chance connue, non nulle et équivalente aux autres, d'être sélectionnée dans l'échantillon. Cette méthode simple à mettre en place n'assure pas une répartition optimale de l'échantillon (cf. figure 4.2), concentré par endroit il laisse des vides dans d'autres.

¹DESABIE 1966 p.98

²CONGALTON 1988 p.595

³FOURNIER 1986 p.28

figure 4.2 - Un tirage aléatoire élémentaire



Il est possible d'améliorer la répartition des points par stratification. Celle-ci peut être réalisée comme nous le verrons à la section 7.1., c'est alors une stratification morphologique fondée sur l'égalité d'apparence ou toute autre variable stratifiante.

En l'absence de connaissances a priori de la zone d'étude, on peut lui préférer une stratification géométrique. Elle consiste à découper la zone d'étude à l'aide d'une grille dont chaque case (strate) reçoit un nombre identique ou non d'unités d'observation. On parle alors de "**tirage aléatoire stratifié**". Cette méthode est très proche du tirage systématique quant à la répartition des unités sur l'ensemble de la zone d'étude.

- Le tirage aléatoire "systématique"

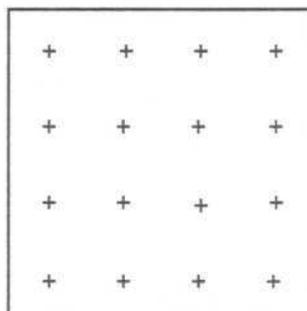
Autre tirage sans biais, il permet, lui aussi, de calculer une estimation de la superficie de chaque thème ainsi que la précision de cette mesure. Ce tirage perd bien sûr le caractère indépendant du tirage aléatoire élémentaire car, seule, l'origine de la grille est tirée au hasard. Cette grille matérialise la progression arithmétique du tirage et permet de positionner les unités d'observation à égale distance les unes des autres, comme dans le cas du "**tirage systématique aligné**" (cf. figure 4.3).

Dans le cas d'un tirage systématique aligné, la couverture de la zone d'étude est optimale. Ce type de tirage risque toutefois d'entrer en "résonance" avec des structures sous-jacentes du paysage. Bien que A. Milne¹ estime que l'on puisse ignorer ce risque, il est préférable, lorsque l'on travaille sur des secteurs où il y a une présomption d'organisation périodique, comme les zones dunaires, de rompre l'alignement du sondage systématique. Il suffit pour cela de reprendre le maillage

¹MILNE 1959 p.294

précédent et de tirer au hasard, pour chaque ligne, une coordonnée horizontale qui est implantée dans chaque maille de la ligne. De même, pour chaque colonne, il est tiré une coordonnée verticale différente d'une colonne à l'autre. La distance qui sépare deux points sur une même ligne ou une même colonne est de ce fait constante (cf. figure 4.4).

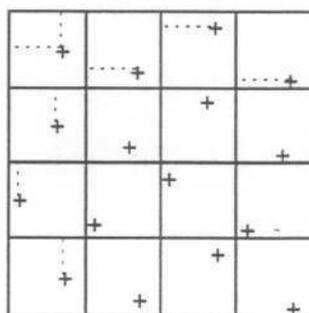
figure 4.3 - Un tirage systématique aligné



De la grille qui a servi à positionner les points, il n'a été représenté que l'intersection les matérialisant.

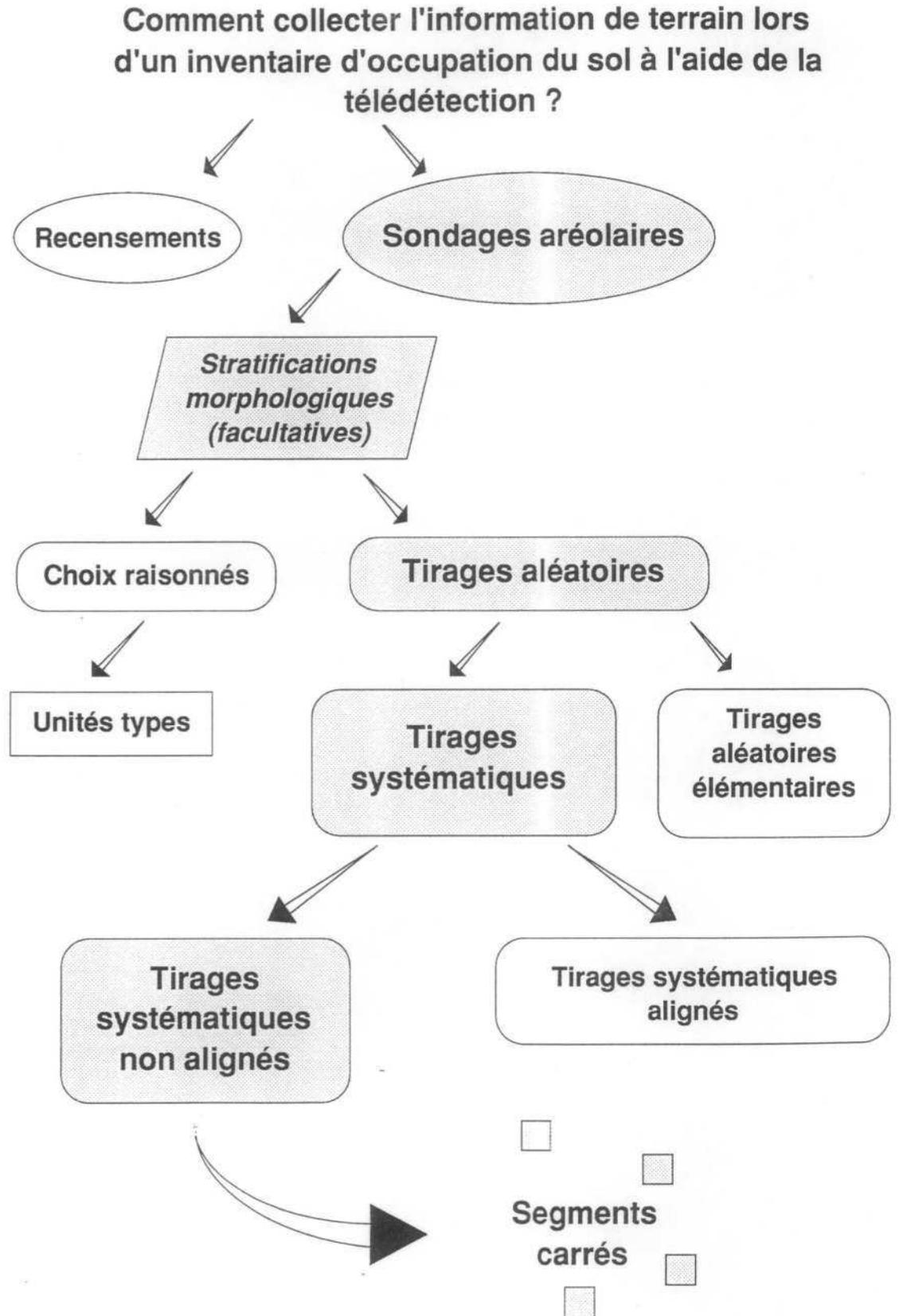
Ce tirage est appelé "**tirage systématique non aligné**", ou encore "**tirage systématique et aléatoire**". Il est pratiquement identique au tirage aléatoire stratifié précédemment cité, seul le tirage des points diffère. Il conserve les mêmes propriétés que les autres tirages aléatoires, tout en s'affranchissant d'une quelconque organisation du paysage. C'est un tirage de ce type que nous avons retenu pour ses qualités et sa simplicité de mise en place (cf. 6.2.). Sauf mention contraire, lorsque le vocable tirage systématique est utilisé sans plus de précision, il s'agit d'un tirage systématique et aléatoire.

figure 4.4 - Un tirage systématique non aligné



Pour cet exemple, le carroyage a été conservé pour que l'on visualise la période du tirage systématique et qu'il ne soit pas confondu avec un tirage aléatoire élémentaire dont la répartition serait particulièrement "heureuse".

figure 4.5 - Résumé de la procédure d'échantillonnage



Comme nous le verrons à la section 6.1., la procédure de tirage échantillonne les points, en général à l'aide d'une grille de sondage dans le cas des tirages systématiques, puis le segment d'enquête est développé à partir de ces points (cf. fig. 6.3).

En conclusion, bien que les sondages empiriques soient attractifs par leur souplesse de mise en place et d'utilisation, nous avons démontré qu'il n'était pas possible de les utiliser en dehors des phases de pré-enquête.

De ce fait, **les enquêtes par segments carrés sont apparues comme les plus favorables à une utilisation conjointe de la télédétection et des enquêtes de terrain** en raison de leur simplicité et de leur adéquation au milieu naturel tropical. Nous les avons donc retenues pour effectuer nos expérimentations et démontrer qu'elles sont les plus à même d'être transférées vers les services des pays hôtes sans qu'il soit nécessaire d'assurer une formation très longue pour en expliquer le maniement et les rendre opérationnelles. Un résumé de la procédure d'échantillonnage est décrit sur la figure 4.5.

Ce chapitre sur les méthodes usuelles d'enquête et de traitement ne serait pas complet sans un descriptif des mises en valeur possibles de l'enquête de terrain associée à la télédétection par les statistiques et la cartographie d'occupation du sol.

4.3. VALORISER L'ENQUÊTE DE TERRAIN

Il a été démontré au cours des précédentes sections que les techniques de sondage sont les seules à remplir les conditions de souplesse et de rapidité nécessaires aux inventaires d'occupation du sol en milieu naturel tropical. Il s'agit maintenant de passer à la validation thématique de la méthode proposée, c'est en quelque sorte l'approche du géographe.

Sonder, nous l'avons vu, revient à n'enquêter qu'une partie de la population d'étude appelée échantillon. De cet échantillon il va falloir "tirer" des indications valables pour l'ensemble du paysage. Le choix d'un plan de sondage judicieux (la méthode d'enquête) et d'un formulaire mathématique approprié, si l'échantillon est aléatoire, permettent d'extrapoler en toute rigueur les résultats obtenus sur l'échantillon à l'ensemble de la zone d'étude. Cependant, comme le note Ch. Gourieroux¹, l'information collectée par l'échantillon ne permet pas de connaître

¹GOURIEROUX 1981 p.8

avec exactitude la valeur du paramètre recherché au niveau du secteur d'enquête, généralement des surfaces dans les études d'inventaire «*il existe ainsi une erreur [...] entre le résultat proposé et la vraie valeur.* ». Cette erreur se subdivise en deux composantes distinctes.

La première composante est appelée **erreur d'échantillonnage**. Elle provient du fait que l'on a utilisé une observation partielle de la population pour établir des résultats valables pour l'ensemble de celle-ci. Il n'y a donc pas d'erreur d'échantillonnage dans un recensement. Lorsque l'échantillon est aléatoire, l'erreur est aléatoire¹.

La deuxième composante est appelée différemment d'un auteur à l'autre, mais tous s'accordent pour lui donner une définition identique. C'est l'**erreur d'observation** ou encore erreur de mesure ou de réalisation. Celle-ci est liée aux conditions concrètes de mise en œuvre de l'enquête². On peut citer, par exemple, l'inaccessibilité d'un site (équivalent du refus de répondre), sa mauvaise localisation, etc. De même, l'absence d'observations exactes sur la population³, que ce soit dans les mesures de biomasse ou la quantification des ligneux, contribue à l'erreur d'observation. Cette erreur peut elle-même être entachée d'un biais systématique, tel que celui induit par un appareil de localisation dérégulé, mais ce biais est normalement indétectable sans confrontation avec des données extérieures⁴. En l'absence de biais systématique avéré, l'erreur d'observation peut être considérée comme aléatoire⁵, elle se retrouve dans les sondages et dans les recensements.

Malgré le fait que les sondages soient soumis aux deux types d'erreur, leur résultat est parfois plus précis que celui des recensements. L.M. Asselin⁶ justifie cela en expliquant que dans un sondage il est possible d'apporter plus de soin à la collecte et donc de réduire le biais, car le volume à collecter est plus faible que dans un recensement.

Il faut cependant noter, à la suite de J. Desabie⁷, que les erreurs d'observation sont plus pénalisantes dans les sondages que dans les recensements car il y a moins d'unités d'observation. De même, ajoute-t-il, «*... lorsqu'une enquête échoue, c'est beaucoup plus souvent du fait des erreurs d'observation que du fait des erreurs d'échantillonnage.*». Il convient donc d'apporter à chaque observation effectuée le plus grand soin.

¹GOURIEROUX 1981 p.8

²ASSELIN 1984 p.11

³DESABIE 1966 p.4

⁴DESABIE 1966 p.468

⁵GOURIEROUX 1981 p.8

⁶ASSELIN 1984 p.12

⁷DESABIE 1966 p.4

Ces deux erreurs se combinent pour former l'**erreur totale**. En l'absence de documents qui permettraient de contrôler les prélèvements de terrain, il n'est pas possible de réduire l'erreur d'observation. On en limitera toutefois les effets en évitant, a priori, les variables difficiles à mesurer et, répétons-le, en apportant le plus grand soin à la collecte.

En plus de cela, toujours pour améliorer les résultats, on choisira une méthode d'échantillonnage probabiliste car *«seuls les sondages probabilistes permettent d'estimer, à l'issue du processus de collecte, l'erreur d'échantillonnage et donc d'agir sur le plan de sondage pour la réduire.»*¹.

Précisons, cependant, que l'effort doit être judicieusement réparti et qu'il est irrationnel de chercher à réduire l'erreur d'échantillonnage si l'on a conscience d'avoir commis des erreurs d'observation importantes et non amendables. De même, il n'est pas rentable de recourir à des méthodes mathématiques sophistiquées si elles ne réduisent que faiblement l'erreur d'échantillonnage, car au niveau de l'erreur totale cette réduction sera insignifiante. A la suite de quoi, Ch. Gourieroux² estime qu'il est même possible de faire des approximations dans le calcul de l'erreur moyenne d'échantillonnage, car l'incidence est faible au niveau de l'erreur totale.

Dans la mesure où, pour les inventaires d'occupation du sol en milieu naturel tropical, il n'est pas possible de faire appel à une source documentaire extérieure pour évaluer l'erreur d'observation, soit parce qu'il n'y a pas d'autre étude, soit parce que celles qui existent ne sont pas fiables, nous n'interviendrons que sur l'erreur d'échantillonnage. Ceci n'exclut pas de tout mettre en œuvre pour réduire l'erreur de mesure qui, bien qu'inconnue, est pourtant présente.

Les différents travaux auxquels nous avons fait allusion abordent la notion d'erreur avec une problématique relevant de la théorie des sondages, puis ils décrivent les prolongements statistiques associés à la réduction de l'erreur d'échantillonnage en exposant les plans de sondage possibles avec leur formulaire. Un aspect pourtant fondamental est ignoré par ces statisticiens, il s'agit de la cartographie qui est tout autant tributaire de la théorie des sondages que les statistiques. Elle sera donc étudiée au même titre que celles-ci.

¹BARBARY 1988 p.21

²GOURIEROUX 1981 p.10

4.3.1. Améliorer la précision des statistiques

J. Desabie¹ estime que «pour qu'une enquête par sondage donne une description satisfaisante de la population étudiée, il importe :

- a) de choisir judicieusement le mode de désignation de l'échantillon ;
- b) de procéder à des observations exactes auprès des individus-échantillon ;
- c) d'extrapoler correctement et efficacement à la population les observations réalisées sur l'échantillon : c'est le problème du choix de l'estimateur, lequel est intimement lié à celui du choix de l'échantillon.»

Nous avons déjà traité les deux premiers points, il nous reste donc à sélectionner un estimateur. L'estimateur est "l'instrument statistique" qui permet d'extrapoler à la zone d'étude les résultats constatés au niveau de l'échantillon. Cet estimateur possède une variance dite variance de l'estimateur. C'est elle qui permet le calcul de la précision des estimations de superficies.

Comme l'indique G. Saint², l'estimateur doit être robuste et simple d'emploi. Robuste signifie, d'après J. Delincé³, que la statistique prise comme estimateur est «... insensible à la répartition spatiale.». Cet estimateur ne doit donc pas être trop sensible aux conditions difficiles des inventaires d'occupation du sol en milieu naturel tropical. De plus, il doit être facilement transférable vers de futurs utilisateurs locaux. Enfin, il est choisi en fonction de son opérationnalité potentielle qui consiste en une très bonne adéquation des enquêtes de terrain et de la télédétection.

En raison de son utilisation en milieu naturel tropical, cet estimateur doit être fiable sans le secours d'aucune donnée extérieure, que ce soit pour sa mise en application ou son contrôle. Or les sondages probabilistes ont l'avantage sur les autres types de sondage de "s'auto-évaluer", comme l'écrit O. Barbary⁴. Ils fournissent un estimateur de la variance qui constitue une mesure de l'erreur d'échantillonnage et permettent le calcul de la précision atteinte pour le poste d'occupation du sol considéré. Dans la mesure où l'on souhaite la plus grande précision possible, il faut réduire la variance, donc l'erreur d'échantillonnage. Il existe pour cela plusieurs possibilités.

¹DESABIE 1966 p.3

²SAINT 1988 p.250

³DELINCE 1983 p.1

⁴BARBARY 1988 p.26

Les sondages probabilistes sont soumis à la loi des grands nombres. On constate de ce fait que l'erreur d'échantillonnage décroît avec l'augmentation de la taille de l'échantillon¹. Pour améliorer la précision d'une enquête, il faut donc enquêter beaucoup d'unités d'observation. Or pour des raisons budgétaires, on cherche plutôt à réduire le nombre des unités enquêtées. De ce fait cette possibilité n'est pas retenue, il nous faut chercher autre chose.

J. Desabie² a recensé les principales méthodes d'amélioration de la précision qui n'entraînent pas d'augmentation du coût de l'enquête. Nous nous sommes inspiré de sa recherche et en avons extrait les méthodes qui nous concernaient. Il s'agit des stratifications, tirages systématiques, sondages à plusieurs degrés et de ce qu'il regroupe sous l'appellation «*utilisation dans les formules d'estimations d'informations obtenues par ailleurs ...*». Les trois premières méthodes doivent être mises en place avant de partir sur le terrain, alors que la dernière intervient en phase de calcul après le retour de mission.

4.3.1.1. *La stratification*

Le sondage stratifié est recommandé par de nombreux auteurs pour améliorer la précision des statistiques. J. Desabie³ écrit d'ailleurs «... *qu'une stratification même très imparfaite, est préférable à une absence totale de stratification.*». Le gain de précision est pratiquement toujours présent.

Nous avons donc souhaité comparer pour une même zone les résultats issus d'un tirage dit élémentaire, bien que systématique (cf. 4.2.2.2.) et ceux issus d'un tirage stratifié. Le tirage stratifié relève ici d'une **stratification morphologique**, c'est-à-dire qu'il est basé sur l'homogénéité d'une ou plusieurs variables (spectrales, texturales, etc.). Il s'oppose à la **stratification géométrique** implicite du tirage systématique qui est fondée sur la répartition spatiale liée au mode de tirage. Cette étude devait être réalisée en deux phases, la première sans stratification et la deuxième avec, le but étant de déterminer le gain de précision obtenu pour ce type de milieu d'une phase sur l'autre.

La première phase a bien eu lieu en mars-avril 1988, mais les événements d'avril 1989 entre le Sénégal et la Mauritanie n'ont pas permis de réaliser la seconde phase. Nous n'avons pas eu de résultat pour la stratification morphologique, et

¹ASSELIN 1984 p.16

²DESABIE 1966 p.123

³DESABIE 1966 p.135

n'avons donc pas su de combien on pouvait espérer améliorer les résultats par rapport au tirage élémentaire de la première phase. Cette recherche reste à mener.

Les seules stratifications morphologiques que nous ayons testées concernent la réalisation des masques de classification. Nous verrons au paragraphe 7.1.2. comment il est possible d'automatiser et de fiabiliser la réalisation de ces masques de stratification.

4.3.1.2. *Le tirage systématique*

En plus de la stratification implicite, le tirage systématique possède quelques particularités. Comme nous l'avons déjà exposé, notre approche relève des méthodes aréolaires. Or ces méthodes sont une ramification des **tirages en grappes**, car d'une part «*l'aire est une grappe particulière.*»¹ et d'autre part «*lorsque la grappe est constituée par une zone géographique, on parle de sondage aréolaire.*»². Une grappe est constituée d'un nombre entier de pixels (la somme de ceux des segments), dans notre cas, chaque pixel (l'unité statistique) est rattaché à une grappe et une seule.

Les pixels à l'intérieur d'une grappe ont tendance à se ressembler plus que lorsqu'ils sont issus d'un tirage élémentaire à cause de leur proximité géographique dans les segments. Cela entraîne deux conséquences, le tirage en grappe est généralement moins précis que le tirage élémentaire pour un même nombre d'unités statistiques visitées mais il est aussi moins coûteux. Car pour enquêter ces unités statistiques, les temps de liaison entre pixels sont bien moindres pour le tirage en grappe (contiguïté dans les segments) que dans le tirage élémentaire. Il en résulte que l'on en visite bien plus dans le tirage en grappe et qu'en définitive, la précision est meilleure que pour un tirage élémentaire. Enfin, «*... une grappe échantillon ne doit pas être considérée comme un échantillon élémentaire d'un même nombre d'unités statistiques ...*»³. De ce fait l'estimation des performances du sondage aréolaire est un peu plus compliquée que pour un sondage élémentaire.

On verra plus loin que l'on tire des pixels indépendants pour constituer l'échantillon. Ils ne sont que le point origine qui sert à développer le segment dans lequel seront sélectionnés les groupes de pixels associés par une radiométrie homogène. Seuls ces groupes appelés unités d'observation (cf. 5.2.1.) sont enquêtés, ils permettent de renseigner chaque segment.

¹DESABIE 1966 p.118

²DEROO 1980 p.94

³DESABIE 1966 p.107

O. Barbary¹ propose une solution intéressante à mettre en œuvre. Il constate que *«la difficulté d'estimer la variance des estimateurs associés à des plans de sondages systématiques vient du problème suivant : le sondage systématique est en fait un cas particulier de sondage en grappe mais dans lequel on ne sélectionne qu'une seule grappe. La variance des estimateurs dépendant de la variance inter-grappe et le sondage n'en ayant sélectionné qu'une seule, on se trouve dans l'impossibilité d'estimer sa variance.»*.

Pour contourner cette impossibilité, J. Desabie² propose d'assimiler le tirage systématique *«... au schéma de tirage suivant : l'univers est découpé en $m/2$ strates égales [m : nombre de segments dans l'échantillon] chacune d'entre elles contenant $2(M/m)$ unités consécutives de la population [M est le nombre total de segments de la zone d'étude].»*. Cela revient à découper l'univers en un très grand nombre de strates, une pour deux éléments de l'échantillon.

O. Barbary³ a adapté cette proposition pour les méthodes aréolaires. Après avoir donné les formules de l'estimateur de la moyenne, il décrit le principe de la proposition comme suit : *«l'idée est en fait d'utiliser les formules d'estimations et de variances liées au sondage stratifié, en stratifiant la base de sondage à l'aide de l'ordre de la liste, et cela en créant un nombre maximal de strates. Ce nombre n'est limité que par la contrainte que l'on se donne de pouvoir calculer un estimateur de la variance de l'estimation dans chaque strate ; l'échantillon doit donc contenir au moins deux individus de chaque strate.»*.

L'adaptation de la proposition aux méthodes aréolaires se fait à l'aide d'un maillage que l'on superpose au document satellitaire. La maille est la strate géométrique recherchée, elle remplace l'ordre de la liste par un ordre géographique. A l'intérieur de cette maille deux segments sont tirés (cf. 6.2.). Dans notre cas, toutes les mailles sont carrées et identiques en superficie. Ceci est dû au fait que l'on a choisi comme support d'enquête des segments tous identiques sur l'ensemble de la zone d'étude. Le même O. Barbary⁴ a dû en milieu urbain adapter la taille du maillage à celle des îlots pour conserver un taux de sondage à peu près constant. Ce problème ne se pose pas en milieu naturel, tropical ou non, car le segment est relativement indépendant du paysage

Nous n'avons pas pu mettre en pratique de stratification morphologique pour les raisons exposées précédemment. Il n'est pas sûr que les résultats en aient été

¹BARBARY 1988 : 38-39

²DESABIE 1966 p.171

³BARBARY 1988 p.202

⁴BARBARY 1988 p.202

altérés. En effet, toujours dans une problématique urbaine, O. Barbary¹ compare les résultats obtenus sur trois caractères démographiques pour une stratification géométrique d'une part et morphologique d'autre part. Il constate que le gain de précision obtenu «... par la bonne répartition spatiale de l'échantillon peut être égal et même supérieur à celui dû à la stratification morphologique mais qu'il varie suivant le caractère démographique auquel on s'intéresse.»

Toutes choses égales par ailleurs, on peut donc s'attendre à des résultats au moins aussi bons avec notre approche par tirage systématique seul que si celui-ci était couplé à une stratification morphologique. De plus, ces deux stratifications sont en partie redondantes. Leurs gains respectifs ne s'additionnent certainement pas intégralement. Malgré l'absence de comparaison entre les deux méthodes on peut toutefois affirmer que **les enquêtes aréolaires par sondages systématiques ne nécessitent pas de stratification morphologique pour être performantes** car elles bénéficient déjà de la stratification géométrique implicite liée au tirage systématique.

Au prix de quelques adaptations, le tirage systématique, envisagé comme un sondage stratifié, permet de faire une estimation de variance. Celle-ci est légèrement surestimée² mais simple à mettre en œuvre. Il existe d'autres méthodes qui permettent de réaliser des estimation de variances. Certaines sont même qualifiées de "robustes". Cela signifie qu'il est possible d'estimer des variances tout en ignorant les lois de probabilités qui régissent les estimateurs et qu'elles sont "naturellement" peu sensibles à la répartition spatiale de l'échantillon³.

Cependant, malgré leur robustesse nous ne les avons pas retenues car nous ne disposons pas des programmes informatiques nécessaires. Ce ne sont pas, de toute façon, des méthodes simples d'emploi. Elles semblent moins adaptées, dans l'état actuel de nos connaissances, à un transfert de compétence que les stratifications.

Pour plus de détail à ce sujet nous renvoyons au chapitre «*Méthodes d'estimation de variances*» de J.M. Grobras⁴. Les méthodes de linéarisation, du BRR (*Balanced Repeated Replication*), du Jackknife et enfin du Bootstrap y sont décrites. Pour la méthode Bootstrap que d'aucuns décrivent comme la plus prometteuse, nous conseillons particulièrement l'article très accessible de P. Diaconis et B. Efron⁵ sur les calculs massifs.

¹BARBARY 1988 p.205

²DESABIE 1966 p.172

³DELINCE 1983 p.1

⁴GROBRAS 1987 : 327-331

⁵DIACONIS 1983

4.3.1.3. Le sondage à plusieurs degrés

Le recours aux sondages à plusieurs degrés peut dans certains cas améliorer la précision de l'échantillonnage. Nous devons recourir à un sondage à deux degrés pour deux raisons.

La première est inhérente au tirage retenu. En effet, comme l'explique Ch. Gourieroux¹ : «*lorsque tous les tirages au deuxième degré sont des recensements, le plan est dit tirage en grappes.*». Dans la mesure où le premier degré du tirage est constitué par les segments, puis que la totalité des unités secondaires (les pixels) va être enquêtée dans chaque unité primaire (les segments), nous sommes bien dans ce cas de figure.

Il est donc possible de considérer que l'on a implicitement eu recours à un tirage à deux degrés dans le cas des sondages par segments carrés. Et que par là-même, nous avons cherché à gagner en précision en donnant une taille identique à toutes nos unités primaires. En effet, cette méthode est considérée comme très imprécise lorsque la taille des unités primaires est très variable². Nous justifions ainsi a posteriori le choix des segments de taille identique. Enfin, comme cela a été démontré précédemment, le choix des segments carrés implique celui du tirage en grappes et donc une recherche de l'optimisation du temps d'enquête.

Nous souhaitons toutefois réaliser un sondage à plusieurs degrés pour une autre raison. Celle-ci, déjà partiellement évoquée, est liée aux besoins de quantification de certains paramètres, essentiellement la biomasse. Initialement prévu dans la même phase d'enquête que la stratification morphologique, le sondage à deux degrés n'a pu être étudié. Son apport dans l'évaluation de la biomasse reste à déterminer. Notons toutefois qu'il est certainement le point de passage obligé pour ce type de quantification.

En effet, il est difficilement concevable d'utiliser un tirage à un seul degré pour l'évaluation de la biomasse. Cela signifierait que l'on se ramène au sondage par points ou placettes avec les difficultés que cela comporte pour l'affectation terrain-pixels, ou au contraire, que l'on coupe plusieurs centaines de mètres carrés d'herbe par site. Cet aspect sera développé à la section 6.4. avec les problèmes de localisation.

¹GOURIEROUX 1981 p.90

²DESABIE 1966 p.104

4.3.1.4. Apport d'une information exogène

Lors de l'extrapolation des résultats, de l'échantillon à la zone d'étude, il est tentant de vouloir réduire les fluctuations aléatoires des estimations. Pour "redresser" un échantillon, c'est-à-dire réduire l'erreur d'échantillonnage, l'apport d'informations supplémentaires est envisagé. J. Desabie¹ décrit trois types d'estimation faisant intervenir des informations supplémentaires. Il s'agit de :

- l'estimation pondérée (stratification a posteriori) ;
- l'estimation par le quotient ;
- l'estimation par la régression.

Il existe d'autres méthodes d'estimations, mais celles-ci sont les plus courantes et représentatives des avantages et inconvénients liés au redressement d'échantillons. Redressement qui n'a rien à voir avec un "trucage", il s'agit seulement d'utiliser avec les résultats de l'enquête des informations supplémentaires², «*ces informations supplémentaires viennent des valeurs prises par l'échantillon ; les techniques de redressement ne peuvent donc être appliquées qu'après l'enquête.*»³. En fonction des informations supplémentaires disponibles pour nos zones d'étude, nous allons déterminer quelle méthode d'estimation est la plus satisfaisante en regard de notre problématique.

- La stratification a posteriori

Son principe est exactement le même que celui qui a été défini pour la stratification a priori. Elle répond au même besoin de réduction des erreurs aléatoires. Cependant, comme elle n'intervient qu'après coup, le gain de précision sera en général moins net que si elle était intervenue au moment de l'organisation de l'enquête⁴.

La méthode consiste à rechercher dans la base de sondage une variable de stratification qui, soit n'était pas disponible au moment des préparatifs qui ont précédé l'enquête, soit ne s'est révélée intéressante qu'après coup pour la stratification et donc l'amélioration de la précision des résultats⁵. Cette variable

¹DESABIE 1966 p.173

²LABAT 1983 p.13

³BRION 1982 p.29

⁴GROSBRAS 1987 p.115

⁵BRION 1982 p.29

doit avoir une distribution statistique connue, voire être issue de la même base de sondages que la variable à estimer, les superficies d'inventaire. Il doit de plus y avoir une forte corrélation entre ces deux variables¹.

Comme cela a été énoncé précédemment, l'étude se déroule dans des régions où la chance d'obtenir des informations exogènes et pertinentes vis-à-vis de l'enquête est pratiquement nulle. Il ne faut donc pas compter sur un quelconque apport extérieur pour tester cette méthode dans le cas le plus général. A notre connaissance, il n'y a que les résultats des classifications automatiques, regroupés en strates en fonction des besoins, qui peuvent remplir toutes les conditions énumérées ci-dessus (cf. 7.1.).

Dans la mesure où la procédure des classifications-stratifications automatiques a été mise au point après la publication des résultats de l'inventaire, cet aspect n'a pas été pris en compte pour le redressement des estimations, ce sont d'autres estimateurs qui ont permis les gains de précision présentés au chapitre 9.

- Estimation par le quotient et par la régression

L'information supplémentaire que l'on recherche pour utiliser l'estimation par le quotient ou par la régression doit concerner l'ensemble de la zone d'étude, mais ne doit pas être issue de l'enquête de terrain². De ce fait, et comme nous le laissons entendre précédemment, **les radiométries classées, c'est-à-dire "cartographiées", constituent la seule variable auxiliaire qui permette d'estimer la superficie moyenne de chaque poste d'occupation du sol au niveau de la zone d'étude.** Cela signifie que : **l'estimation de la superficie d'un thème et la précision de cette estimation dépendent de la qualité de la classification issue de la télédétection.**

Notons que cette amélioration ne porte que sur les statistiques. Elle n'améliore pas la précision de la représentation (la cartographie) par ses méthodes mais seulement l'estimation des surfaces. De même, avant de poursuivre, il faut préciser ici que l'on donne un sens différent à classifier/cartographier et à classification/carte.

La classification est une étape intermédiaire dont le produit sert à améliorer les statistiques. Il s'agit d'une image "brute" issue des traitements avant qu'elle n'ait subi de lissage. En revanche la carte ou cartographie est un produit fini, elle succède

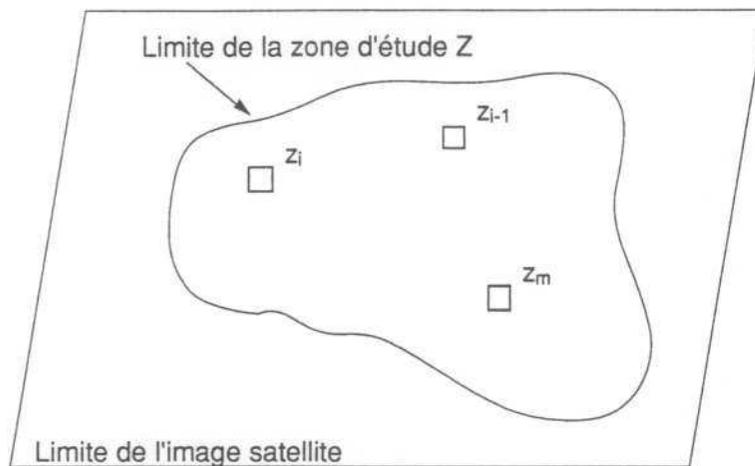
¹DESABIE 1966 p.175

²BARBARY 1988 p.37

à la classification. Elle est moins adaptée aux calculs car elle a subi certains traitements (lissages et autres) pour devenir un document publié.

Donc, le terme **classification** concerne les étapes techniques des traitements, c'est-à-dire l'amélioration des statistiques et le contrôle des traitements cartographiques (cf. 4.3.2.3.), alors que le terme **cartographie**, en principe, ne concerne que le document destiné à être publié. La cartographie peut d'ailleurs, en fonction des résultats et des besoins, comporter un nombre de classes d'occupation du sol différents de celui des statistiques publiées. En revanche pour les calculs, la classification comporte le même nombre de postes que les statistiques.

figure 4.6 - La zone d'étude et les segments



A la suite de J. Meyer-Roux¹, nous allons sélectionner et justifier le choix d'un estimateur en fonction de notre problématique.

Son analyse part du principe que l'on recherche une estimation de la superficie globale d'une catégorie d'occupation du sol k dans une zone d'étude Z connue par enquête. Ce territoire est échantillonné en un certain nombre m de segments z . La télédétection va permettre une classification puis une cartographie de l'ensemble du territoire. Cette classification fournit la variable auxiliaire x_{ki} , au niveau du segment z_i , auquel l'enquête fait correspondre une réalité de terrain y_{ki} .

Lorsque l'on analyse les différentes relations possibles entre les x_{ki} et les y_{ki} , plusieurs cas de figure se présentent. Examinons en premier lieu les relations qui permettent une **estimation par le quotient**, elles sont de la forme :

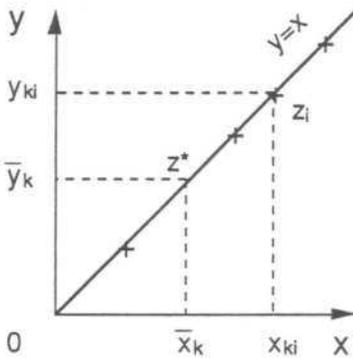
¹MEYER-ROUX 1981c

$$y = ax + b \text{ où } b = 0$$

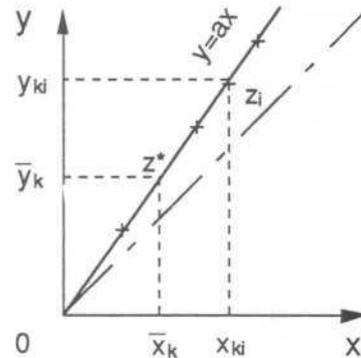
Cela signifie qu'il existe une relation linéaire qui permet de réunir par une droite tous les segments, que cette droite, appelée droite de régression, passe par l'origine (cf. fig. 4.7) et qu'il n'y a aucun biais de classification au niveau des segments dans le cas où $y=x$ et que ce biais est constant dans le cas où $y = ax$ avec $a \neq 1$. Ce biais n'est pas gênant au sens statistique du terme, car il est possible de le calculer et de le redresser. De même, il est indépendant des erreurs d'échantillonnage et d'observation liées à l'enquête de terrain. Les relations unissant les statistiques de terrain à celles issues de la classification sont donc bi-univoques, elles permettent connaissant l'une de calculer l'autre.

figure 4.7 - Relations bi-univoques de la forme $y=ax+b$ où $b=0$

Relation de la forme $y=x$



Relation de la forme $y=ax$



y_{ki} surface du thème k mesurée sur le terrain dans le segment z_i

x_{ki} surface du thème k mesurée sur l'image classée dans le segment z_i

z^* segment barycentre dont la valeur moyenne pour le thème k est $(\bar{x}_k; \bar{y}_k)$

— - — bissectrice $y=x$

———— droite de régression $y=ax+b$

Notons toutefois que J.M. Grosbras¹ juge pour sa part que l'estimateur par le quotient est sans biais si la droite passe par l'origine (a est quelconque et $b = 0$). Il ajoute que ce biais est supportable : lorsque l'échantillon est assez fourni (il est en effet risqué d'effectuer un redressement sur un petit échantillon), si la correction reste limitée ($a \approx 1$) et que y varie en fonction de x , car le biais de l'estimateur sera négligeable par rapport à l'erreur d'échantillonnage.

¹GROSBRAS 1987 p.134

L'examen de ces figures montre que l'on se trouve en présence d'un cas d'école très rare dans notre approche. En effet, la position des segments z est matérialisée par des croix qui se situent exclusivement sur la droite. Il faut en déduire qu'il y a toujours une concordance parfaite entre la réalité de terrain y_{ki} et le résultat de classification x_{ki} au niveau des segments pour le thème k . De plus, la droite de régression passe systématiquement par l'origine ($b = 0$) ce qui signifie que le biais est constant dans chaque segment. La pratique montre que la réalité est un peu différente.

Au niveau du segment, les statistiques de la classification et de la réalité de terrain ne correspondent jamais parfaitement, il y a toujours quelques pixels d'écart. De plus cette relation linéaire a fréquemment tendance à sous-estimer les thèmes faiblement représentés et à surestimer les thèmes déjà prépondérants sur le terrain¹. Lorsque c'est le cas, b est toujours strictement positif. L'ampleur de la sur ou sous-estimation est dépendant de la méthode de classification utilisée (cf. 4.3.2.).

Il faut donc constater que l'estimateur par le quotient ne remplit qu'imparfaitement son rôle et qu'il convient de faire appel à un estimateur plus général, **l'estimateur par la régression**. Celui-ci utilise la même relation linéaire que l'estimateur par le quotient, mais a et b sont ici des réels positifs et non nuls. Le modèle mathématique de la régression est de la forme :

$$y = ax + b + e$$

Ce modèle suppose que :

- y dépende linéairement de x ;
- e soit un "bruit" ou perturbation aléatoire indépendante des X^2 .

On dit aussi que e est une variable aléatoire d'espérance nulle. En clair, c'est un résidu, une variable qui n'est pas estimée par la régression. La somme des résidus d'un même thème au niveau de l'ensemble des segments est égale à zéro³.

$$\sum e_{ki} = \sum (y_{ki} - y'_{ki}) = 0$$

où y'_{ki} est l'ordonnée du point d'abscisse x_{ki} de la droite de régression.

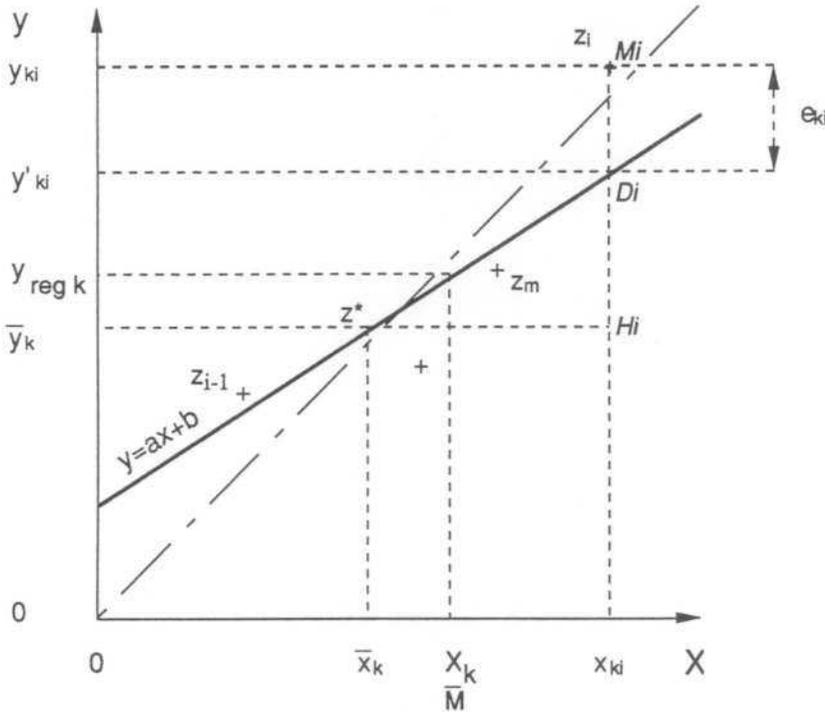
¹MEYER-ROUX 1981c p.12

²CHADULE 1986 p.91

³DESABIE 1966 P.217

figure 4.8 - Estimateur par la régression, la droite des moindres carrés

Estimation de la superficie du thème k par une relation de la forme $y=ax+b$



x_{ki} superficie du thème k mesurée sur l'image classée dans le segment z_i

y_{ki} superficie du thème k mesurée sur le terrain dans le segment z_i

$e_{ki} = y_{ki} - y'_{ki}$ écart entre les superficies terrain et estimées pour k sur z_i

z^* segment barycentre dont la valeur moyenne pour le thème k est $(\bar{x}_k ; \bar{y}_k)$

$\frac{X_k}{M}$ moyenne par segment des superficies classées en catégorie k

$y_{reg k}$ superficie estimée pour le thème k au niveau des segments

— — — — — bissectrice $y=x$

————— droite de régression $y=ax+b$

Le modèle de régression présenté ci-dessus est aussi appelé méthode des moindres carrés. Cette méthode détermine les paramètres "résumant le nuage de segments" de telle sorte que la somme des carrés des résidus soit minimum. La métrique utilisée pour mesurer les résidus est euclidienne¹. Les résidus e_{ki} sont visualisés par la différence entre la position des segments z_i et la droite de régression, c'est la distance M_iD_i (cf. figure 4.8).

¹CHADULE 1986 p.90

Notons aussi que dans une application concrète comme celle qui nous concerne, par opposition à un cas théorique, la droite des moindres carrés est une estimation de la droite réelle. Elle est calculée à partir de l'échantillon de terrain et de celui des classifications au niveau des segments. Cela signifie que a est une estimation de la pente réelle de la droite et que b en est une de l'ordonnée à l'origine. Il en va de même pour les résidus e .

Pour comprendre comment est estimée la superficie du thème recherché à partir de cette droite, il est nécessaire de préciser quelques points.

L'information supplémentaire qui permet de redresser l'estimation est notée X_k , c'est la valeur totale classifiée pour le thème k au niveau de la zone d'étude. Elle est "totale", on dira aussi brute, car c'est, dans notre cas, le résultat d'un comptage exhaustif sur la classification. J. Desabie¹ conseille pour estimer, au niveau des segments, la superficie d'un thème de noter «... pour chacune des unités de l'échantillon, les valeurs de x et y et [d'ajuster] sur l'échantillon la droite des moindres carrés.» puis d'adopter comme estimation de cette superficie \bar{y}_k l'ordonnée $y_{\text{reg } k}$ du point de la droite des moindres carrés dont l'abscisse est X_k .

$$y_{\text{reg } k} = \bar{y}_k + a \left(\frac{X_k}{M} - \bar{x}_k \right)$$

avec :

\bar{y}_k moyenne de la catégorie k , sur le terrain, au niveau des segments ;

a pente de la droite estimée comme suit ;

$$a = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ki} - \bar{x}_k)(y_{ki} - \bar{y}_k)}{\sum_{i=1}^m (x_{ki} - \bar{x}_k)^2}$$

X_k valeur du thème k pour l'ensemble de la zone pilote sur la classification ;

m nombre de segments dans l'échantillon ;

M nombre total de segments compris dans la zone pilote ;

x_{ki} nombre de pixels comptés sur la classification pour le segment z_i ;

\bar{x}_k moyenne de la catégorie k , sur la classification, au niveau des segments ;

¹DESABIE 1966 : 215-216

y_{ki} nombre de pixels comptés sur le relevé de terrain pour le segment z_i .

Si X_k n'a pas de variance, car c'est une donnée brute issue d'un comptage, « $y_{reg k}$ en a une, car la droite des moindres carrés servant à le définir n'est qu'une estimation de la droite réelle inconnue.»¹. La variance de $y_{reg k}$ est estimée par :

$$\text{Var}(y_{reg k}) = \frac{M-m}{M} * \frac{1}{m} * S_e^2$$

et

$$S_e^2 = \frac{1}{m-2} * \sum_{i=1}^m (y_{ki} - y'_{ki})^2$$

avec :

y'_{ki} ordonnée du point d'abscisse x_{ki} de la droite de régression ;

et $e_{ki} = y_{ki} - y'_{ki}$ que nous avons déjà rencontré.

Le formulaire complet de l'estimation par la régression adapté à l'échantillonnage par segments est donné au paragraphe 9.1.1., seul le principe est exposé ici.

J. Desabie² indique que, lorsque «... la relation entre x et y n'est pas linéaire, l'estimateur y_{reg} est légèrement biaisé : le biais est infiniment petit de l'ordre de $1/m$.». Une attention particulière sera donc consacrée au nombre de segments à sélectionner dans l'échantillon (cf. 6.1.). De même, il indique que par définition la variance de l'estimation par la régression est inférieure à la variance de la moyenne \bar{Y}_k (cf. 9.1.2.1.) et à celle de l'estimation par le quotient. Toutefois, ajoute-t-il, «... le gain par rapport à l'estimation par le quotient n'est substantiel que si la droite des moindres carrés passe nettement en dehors de l'origine.». Comme nous le verrons à la section 9.1., où sont exposés les résultats, le recours à l'estimateur par la régression se justifie pleinement de ce point de vue. Des mesures d'efficacité des différentes méthodes seront comparées dans cette section.

A ce propos, il est normal que l'on puisse s'interroger sur l'efficacité d'estimateurs qui utilisent des données comme la classification, car celle-ci est (cf. *supra*) brute, effectivement sans variance mais biaisée. Et cependant, elle tient une place prépondérante dans l'estimateur par la régression comme variable explicative, alors que l'enquête de terrain, dont on peut mesurer le biais, est la variable expliquée. Une telle utilisation des données peut paraître paradoxale, elle fournit cependant de

¹MEYER-ROUX 1981c p.12

²DESABIE 1966 p.216

très bon résultats à un niveau géographique global, c'est-à-dire au niveau de la zone d'étude.

En effet, constate J. Meyer-Roux¹, «on peut assimiler le résultat de la régression à celui d'une enquête statistique par sondage. On sait que ce type d'enquête donne des résultats très fiables à un niveau géographique global car on élimine les erreurs systématiques d'observation qui entraînent un biais, le sondage nous permettant de "soigner" l'enquête. Par contre l'estimation est peu fiable à un niveau géographique fin du fait d'une erreur aléatoire élevée.». **L'utilisation d'une procédure de sondage et d'un estimateur du type estimateur par la régression se justifie donc pleinement au niveau d'une zone d'enquête, ou des strates qui l'a constituent. En revanche, pour des données localisées telles que l'inventaire floristique et la coupe d'un carré de biomasse (cf. 5.2.), voire la description physionomique d'un paysage à l'intérieur d'un segment, on utilisera une démarche proche du recensement.**

En conclusion, des différentes méthodes que nous avons analysées pour réduire l'erreur d'échantillonnage, l'estimateur par la régression est la méthode qui apparaît comme la plus intéressante pour un niveau de complexité encore satisfaisant. On prendra garde toutefois, comme ces méthodes sont compatibles entre elles, de ne pas rechercher le gain maximal de précision, car celui-ci risque de se traduire par des calculs très complexes au niveau de l'estimateur. Cette complexité irait à l'encontre du but recherché, à savoir, faut-il le rappeler, robustesse et simplicité des méthodes en vue d'un transfert vers des non-spécialistes.

Pour les raisons que nous avons évoquées, l'estimateur par la régression est associé dans cette étude au tirage systématique non aligné d'une grappe de segments. Bien que nous ne soyons pas en mesure de fournir les gains de précision spécifiques de chacune de ces méthodes, nous avons constaté que leur contribution globale était satisfaisante en milieu naturel tropical. **Le sondage en grappes apporte la représentativité et une bonne dispersion de l'échantillon, tandis que l'estimation par la régression permet le redressement de l'échantillon au moyen de la classification issue de l'imagerie satellitaire.**

Or, nous avons vu que la qualité des estimations dépendait dans une large mesure de la qualité de la classification. Il convient maintenant de décrire en détail

¹MEYER-ROUX 1981c p.14

cet aspect essentiel de l'intégration de la télédétection et de l'enquête de terrain dans les inventaires d'occupation du sol.

4.3.2. La cartographie et son évaluation

J. Meyer-Roux¹ écrit lorsqu'il compare les intérêts respectifs de la cartographie et de la statistique : *«la cartographie comme la statistique est une représentation codée normalisée, ou symbolique, de la réalité.»*. Cependant, elles ne donnent pas les mêmes résultats car, poursuit-il un peu plus loin, *«la carte est en fait une lecture rapide de [la] statistique dans laquelle on gomme la précision de la statistique au profit d'une vision globale qui va privilégier la représentation spatiale du phénomène et lui donner un caractère relatif. Ce sont les contrastes qui vont attirer et non les valeurs absolues des phénomènes.»*.

La cartographie doit donc être réservée à la visualisation de la répartition et de l'extension spatiale des différents postes d'occupation du sol, alors que les statistiques permettent une approche analytique globale et par poste, ce que ne permet pas la cartographie. Ces deux approches sont donc indispensables.

En effet, les algorithmes de classification ne tiennent pas compte de l'erreur d'échantillonnage qui caractérise les unités d'observation. Les superficies sont évaluées par comptage exhaustif sans pouvoir déterminer cette erreur par une quelconque estimation de la variance (cf. 4.3.1.). Le résultat final, la carte, comporte maintenant trois types d'erreur indissociables (observation + échantillonnage + traitement) dont il est difficile d'évaluer l'importance. On peut donc dire que, si la carte est le meilleur moyen de visualiser l'occupation du sol, elle ne peut pas, à elle seule, fournir au niveau de la zone d'étude des statistiques fiables, autres qu'indicatives.

Dans le cas d'un sondage non probabiliste, on voit tout de suite le problème auquel est confronté le thématicien. Son échantillon ne relève d'aucune loi mathématique, donc aucune formule ne lui permet de calculer de statistiques au niveau de la zone d'étude à partir de celui-ci. De plus, la cartographie qu'il a réalisée comporte une part d'erreur inconnue. Effectuer un dénombrement des pixels constitutifs de chaque classe d'occupation du sol ne fournit qu'un résultat approximatif. Encore convient-il d'ajouter que ce résultat dépend tout à fait de la méthode de classification utilisée.

Il existe deux grandes familles de classifications, l'une est dite "**supervisée**", l'autre "**non supervisée**". Cette dénomination est liée à

¹MEYER-ROUX 1981c p.9

l'intervention ou à la non-intervention du thématique dans les processus de traitement. Comme notre but n'est pas de dresser un inventaire de toutes les méthodes existantes, seules celles utilisées pour cette recherche verront leur choix justifié. Une étude plus détaillée de ces méthodes interviendra lors du descriptif de leur mise en place. Enfin, qu'elles soient supervisées ou non, nous envisagerons les possibilités de contrôle qu'il est possible d'exercer sur les résultats de classification.

Une classification, quelle que soit sa famille d'appartenance, vise à réduire un très grand nombre de données à un petit nombre de catégories, les futures classes d'occupation du sol. Comme pour les statistiques, la réduction de l'information à quelques valeurs synthétiques fait perdre une part importante de la richesse d'une image satellite. En revanche cette opération rend l'information ainsi synthétisée accessible à tous.

Cette information est partitionnée en K classes d'occupation du sol. Si la partition est effectuée automatiquement par un ordinateur et que le thématique se charge ensuite de qualifier les classes par une enquête de terrain, il s'agit d'une méthode non supervisée. Si en revanche, le passage sur le terrain sert à piloter le partitionnement de l'image en un nombre de classes compatible avec le nombre de thèmes identifiés lors de la mission, on parle alors d'une méthode supervisée.

4.3.2.1. *Les classifications non supervisées*

Avant de chercher la finalités des classifications non supervisées, nous allons évoquer celle dont nous disposons et expliquer son fonctionnement. Ces méthodes de classification sont très diverses, mais leur démarche est semblable dans le sens où elles ont toutes des algorithmes qui cherchent à agglomérer les données radiométriques en un certain nombre de groupes distincts. Certaines effectuent les regroupements en fonction d'un nombre de classes fixé à l'avance, d'autres de manière indépendante. On conçoit que les résultats soient assez variables d'une méthode à l'autre.

Pour notre part, nous disposons de méthodes se rattachant aux **nuées dynamiques** mises au point par Diday. Elles permettent de constituer des typologies par regroupement des pixels en fonction de la distance radiométrique. On entend par distance radiométrique, l'écart en valeur entre deux pixels ou entre un pixel et la moyenne d'un groupe de pixels. Dans ces groupes, la distance entre points est minimale, alors qu'elle est maximale entre groupes¹. Une analyse plus complète de ces méthodes sera fournie à la section 7.1. lors du descriptif de la stratification automatique.

¹LOCKER 1980 p.14

En raison de l'absence d'intervention humaine, les méthodes de classification non supervisées apportent une vision objective du terrain au travers des combinaisons radiométriques qu'elles génèrent. Elles sont relativement à l'abri des présupposés du chercheur, en dehors du choix des critères mathématiques¹. De ce fait elles satisfont à nos exigences, car elles n'introduisent pas de biais dans les traitements, donc dans les estimations de superficie.

Cependant, elles possèdent un inconvénient majeur si l'on souhaite les utiliser comme résultat cartographique, car elles sont très sensibles aux pixels mixtes². Un pixel mixte est un pixel qui est à cheval sur deux thèmes et dont la valeur est la combinaison radiométrique de ces deux thèmes. Avant la mission de terrain, il n'est pas possible de savoir si parmi les groupes constitués, surtout les petits, certains ne sont pas des "fourre-tout" uniquement constitués de pixels mixtes.

Si les classifications non supervisées sont à notre sens trop peu fiables pour servir de support à la publication des résultats, statistiques et cartographiques, en raison du problème des thèmes fourre-tout, en revanche elles sont indispensables pour préparer l'inventaire.

En effet, avant d'aller sur le terrain, nul ne sait combien de classes d'occupation du sol il va rencontrer. De plus, en fonction de la période de prise de vue, le nombre de ces classes peut être très variable. On a donc tout intérêt à recourir à une classification non supervisée, sur des données satellitaires de même période que l'enquête mais de quelques années antérieures. Ces traitements fournissent alors un ordre de grandeur sur la diversité thématique dont il est possible de rendre compte, que ce soit d'un point de vue cartographique ou statistique. Cela permet aussi en fonction des résultats d'avancer ou de retarder missions et prises de vue pour améliorer la restitution des thèmes d'intérêt majeur.

En l'absence de connaissance de la zone d'étude, il n'est pas possible de construire de nomenclature autour des résultats obtenus³ ; il faudra donc attendre un passage sur le terrain. En revanche, en regroupant certaines classes d'occupation du sol entre elles, il est possible de réaliser une stratification au moins partiellement automatique (cf. 7.1.).

En conclusion, le but que nous avons affecté aux classifications non supervisées n'est pas de réaliser une cartographie définitive mais de faciliter la préparation de la mission de terrain et de

¹AMAN sd p.11

²MEYER-ROUX 1981b p.16

³FOURNIER 1985b p.5

fournir une stratification automatique. Cette classification permettra, le cas échéant, de répartir géographiquement les unités d'observation de l'échantillon ou, comme dans le cas présent, d'effectuer les traitements par zone homogène d'un point de vue thématique et radiométrique.

4.3.2.2. *Les classifications supervisées*

Les méthodes des nuées dynamiques ont facilité la préparation de l'enquête de terrain et de certaines étapes du traitement cartographique. Il a cependant été nécessaire d'utiliser une autre forme de classification pour ne pas risquer de créer des thèmes "fourre-tout" difficilement valorisables par l'estimateur par la régression.

La classification supervisée utilisée relève des classifications par **maximum de vraisemblance**. Les pixels sont affectés à une classe en fonction de la distance radiométrique qui les sépare des différents centres de classes mais aussi de leur probabilité d'appartenance à cette classe. Cette probabilité est calculée par rapport à la fréquence d'apparition dans les zones d'entraînement¹. Les zones d'entraînement sont les "parcelles", ou groupes de pixels, qui servent à initialiser les traitements. Enfin, le logiciel utilisé permet de déterminer un seuil de rejet². Celui-ci est fonction de la variabilité de la classe considérée et du nombre de canaux pris en compte par la classification. Il est calculé sur les zones d'entraînement et détermine la probabilité d'appartenance minimale à cette classe.

La méthode du maximum de vraisemblance s'appuie sur l'hypothèse que les pixels d'entraînement sélectionnés suivent une distribution normale à plusieurs variables³. C'est-à-dire que l'échantillon de pixels retenu pour initialiser les traitements a des caractéristiques radiométriques (moyenne, écart-type, etc.) très proches de celles de la classe dont il est extrait. Il est donc représentatif de celle-ci. Pour cela, il doit aussi avoir une taille minimum (cf. 8.1.).

La procédure suivie est liée à notre connaissance du terrain, limitée aux segments, seules entités enquêtées en raison de ce qui a été défini précédemment. Les classifications se font donc d'abord au niveau des segments où l'on recherche la meilleure adéquation entre l'enquête de terrain et ce que fournissent les traitements. Puis cette adéquation optimale trouvée, les paramètres calculés sur les segments sont appliqués à l'ensemble de la zone d'étude toujours sous la règle du maximum de vraisemblance.

¹LEVESQUES 1987 p.67

²NUMELEC 1987 p.VI-14-1

³MEYER-ROUX 1981a p.16

On comprend aisément que le recours à la méthode du maximum de vraisemblance requiert, comme pour l'estimation par la régression, des unités d'observation représentatives de l'ensemble de la zone d'enquête. Car la connaissance que l'on a de ce territoire ne repose que sur celle des segments. S'ils ne sont pas représentatifs, il est très difficile, voire impossible, de trouver les parcelles d'initialisation indispensables pour cartographier certains thèmes. Tout comme nous avons démontré qu'il est difficile d'estimer avec une précision satisfaisante leur superficie. Le problème de la représentativité des segments concerne aussi celui du contrôle des résultats de la classification.

4.3.2.3. *Le contrôle de la classification*

Nous avons vu que la classification sert à visualiser d'une manière globale, à l'échelle de la zone d'étude, une statistique dont l'aspect chiffré serait tronqué au profit d'une spatialisation des contrastes entre les différents thèmes. Cette statistique visuelle est perceptible en une seule image, elle est donc efficace au sens où l'entend J. Bertin¹. Cette statistique "rétinienne" est peut-être efficace pour visualiser instantanément la répartition et l'importance de chacun des thèmes, mais nous ne connaissons pas son exactitude. De plus, nous savons que cette classification est indispensable pour redresser les estimations des statistiques chiffrées. Cet aspect requiert lui aussi une classification fiable. Il faut donc pouvoir contrôler la qualité des traitements cartographiques.

Pour répondre à cette question, l'usage des **matrices de confusion** s'est généralisé ces dernières années. Ces matrices sont des tableaux de contingences dans lesquels sont regroupés les résultats des contrôles effectués sur un certain nombre de pixels. Les contrôles consistent à comparer des pixels dont on connaît la réalité de terrain par enquête, ou par une source documentaire extérieure (photographie aérienne ou autre), et leur équivalent sur la classification.

Rappelons que le contrôle s'effectue au niveau des classifications et non à celui de la cartographie (cf. 4.3.1.4.). A ce niveau, la matrice de confusion recense les concordances et les discordances entre le terrain et l'image classée. On parle aussi de tableau de contingence car la somme en ligne et en colonne des résultats a une signification et permet le calcul d'indices qui qualifient la classification, globalement et par thème.

¹BERTIN 1973 p.146

tableau 4.2 - Matrice de confusion

		I	M	A	G	E	
T	Thèmes	a	*	k	*	l	Σ terrain
E	a	n_{aa}		n_{ka}			n_{+a}
R	*		n^{**}				n_{+*}
R	k			n_{kk}		n_{lk}	n_{+k}
A	*				n^{**}		n_{+*}
I	l					n_{ll}	n_{+l}
N	Σ image	n_{a+}	n^{*+}	n_{k+}	n^{*+}	n_{l+}	$\Sigma n_{++}=v$

Σ terrain : nombre total de points enquêtés sur le terrain par thème

Σ image : nombre total de points contrôlés sur l'image classée par thème

$\Sigma n_{++}=v$: somme des points contrôlés sur le terrain ou l'image

La matrice de confusion peut aussi s'exprimer en valeur relative.

Lorsque l'on confronte l'affectation des pixels entre l'image classée et le terrain, à l'aide de la matrice de confusion, on aboutit à trois cas de figure :

- Le pixel, ou groupe de pixels, contrôlé appartient à la catégorie k sur l'image et le terrain, il est comptabilisé sur la diagonale en n_{kk} (cf. tab. 4.2). La classification est fidèle à l'enquête de terrain.
- Le pixel terrain est de la catégorie k mais il est classé en catégorie l. Il est comptabilisé en dehors de la diagonale, dans n_{lk} . Il s'agit d'une **erreur par omission**¹.
- Le pixel terrain est de la catégorie a mais il est classé dans la catégorie k. Il est lui aussi comptabilisé en dehors de la diagonale, mais dans n_{ka} . Il s'agit alors d'une **erreur par commission**.

L'erreur par omission signifie donc que le thème k est sous-représenté sur la classification par rapport au terrain. Il a subi une érosion lors des traitements. Cette erreur est calculée par $n_{+k}-n_{kk}$.

L'erreur par commission signifie au contraire qu'il est sur-représenté. Il a donc été très attractif lors des traitements vis-à-vis de thèmes probablement moins stables radiométriquement. Cette erreur est calculée par $n_{k+}-n_{kk}$.

¹HAY 1979 p.529

Dès lors que l'on a calculé les erreurs qui affectent la classification, il devient nécessaire de déterminer si elles sont acceptables ou s'il faut reprendre les traitements. D'après S. Aronoff¹, ces erreurs induisent deux risques. Le premier est lié à la probabilité pour un producteur de carte de rejeter une carte satisfaisante et de la refaire, c'est le risque du producteur (*producer's risk*). Le deuxième est lié à la probabilité pour un utilisateur d'accepter une carte inexacte, c'est le risque de l'utilisateur (*consumer's risk*). Pour évaluer ces risques de nombreux indices de précision ont été mis au point. On se référera à la matrice de confusion (cf. tab. 4.2) pour l'analyse des membres des équations.

Le risque du producteur est estimé en déterminant la **Précision thématique** (Pt), encore appelée précision à la réalisation. Elle permet de savoir dans quelle mesure l'enquête de terrain est fidèlement représentée, elle se calcule comme suit :

$$Pt = \left(\frac{n_{kk}}{n_{+k}} \right) * 100$$

Le risque de l'utilisateur est estimé en déterminant la **Précision cartographique** (Pc), encore appelée précision à l'utilisation. Elle permet de savoir dans quelle mesure l'information lue sur la carte est le reflet de la réalité, elle se calcule comme suit :

$$Pc = \left(\frac{n_{kk}}{n_{k+}} \right) * 100$$

Ces deux indices (Pt et Pc) ne sont utilisables que par catégorie, leur mode de calcul ne permet pas d'évaluation globale ni de comparer deux classifications différentes. Pour avoir cet aperçu général de la qualité de la classification nous utiliserons la formule, maintenant très classique, de la **Précision globale** (Pg) :

$$Pg = \frac{\sum_{k=1}^l n_{kk}}{v} * 100$$

où n_{kk} est la somme des points bien classés pour tous les thèmes, lue sur la diagonale, divisée par le nombre total de points de contrôle v . Les formules de ces indices sont établies pour que le résultat soit exprimé en pourcentage.

Enfin, une autre estimation globale, mais thème par thème celle-là, est proposée par G.H. Rosenfield et K. Fitzpatrick-Lins². Ces deux auteurs ont comparé un certain nombre d'indices de précisions et parmi ceux-ci, deux indices ont

¹ARONOFF 1982 p.1299

²ROSENFELD 1986

particulièrement retenu notre attention, il s'agit de l'indice dit **statistique de Kappa** et de celui de la précision moyenne ou encore **indice de Hellden**.

Nous n'avons pas retenu la statistique de Kappa en raison de sa complexité d'utilisation et des polémiques que cette complexité a entraînées. Nous renvoyons les lecteurs intéressés par les rebondissements de cette affaire à l'article de W.D. Hudson et C.W. Ramm¹. Nous lui avons préféré l'indice de Hellden, indice logique qui bien que dénué de fondements probabilistes², est simple d'emploi et fonctionnel.

L'indice retenu est appelé précision moyenne (MA pour *mean accuracy*) ou encore indice de Hellden. Il se développe comme suit :

$$MA = \left(\frac{2n_{kk}}{n_{k+} + n_{+k}} \right) * 100$$

avec toujours :

n_{kk} le nombre de pixels bien classés par catégorie k ;

n_{k+} la somme des points classés dans la catégorie k ;

n_{+k} la somme des points enquêtés sur le terrain dans la catégorie k.

Cet indice est utilisé par catégorie, il vient en complément de la précision thématique et cartographique. Il remplace avantageusement, à notre avis, l'indice de **précision statistique** utilisé pour la publication des résultats 1981 des simulations SPOT sur le Lauragais³. Cet indice fait le rapport : données de classification sur données de terrain par thème. Il ne prend pas l'élément diagonal de la matrice en considération dans ses calculs, contrairement à l'indice de Hellden.

Pourtant, comme nous le verrons sur nos zones d'étude (cf. 8.3.), la précision statistique fournie par l'indice de Hellden, malgré un comportement moins optimiste que l'indice de précision statistique précédemment évoqué, reste comprise dans la fourchette "d'acceptabilité" établie en 1981 toujours pour l'expérience Lauragais⁴, où il est dit :

«on peut donc considérer qu'une erreur "statistique" en télédétection

- inférieure à 5 p.100 correspondra à un résultat excellent

¹HUDSON 1987 : 421-422

²ROSENFELD 1986 p.226

³GDTA 1984 p.34

⁴GDTA 1984 p.35

- *de l'ordre de 10 p.100 sera comparable aux investigations traditionnelles*
[type Recensement Général de l'Agriculture (RGA), ou autre]
- *supérieure à 15 p.100 sera considérée comme trop forte.»*

Bien que relativement rustiques, ces indices sont indispensables pour évaluer la cartographie d'occupation du sol, ils doivent être fournis avec la carte sous peine de jeter un discrédit sur la validité de celle-ci en cas d'absence. Ils ne peuvent pas non plus être remplacés par les statistiques d'occupation du sol. Ces deux notions sont complémentaires et non interchangeables.

Ils sont indispensables dans la mesure où ils permettent de contrôler si l'adéquation globale mise en évidence et exploitée par l'estimateur par la régression au niveau du segment (cf. 9.1.2.1.) est fortuite ou spatialement avérée. On dira que l'adéquation est fortuite lorsque les pixels d'un même thème sur le terrain et sur la classification ne se correspondent pas spatialement. Cela se traduit par une estimation de superficie qui peut être satisfaisante mais une cartographie où le niveau de lecture supérieur est erratique. Le niveau de lecture supérieur¹ est celui qui répond à la question "où se situe le thème k ?".

Les indices que nous avons déterminés nous permettent de répondre à l'essentiel des questions que l'on se pose face à une carte d'occupation du sol : tel thème est-il sur ou sous-représenté, de combien, etc. Il reste toutefois quelques inconnues. Quelle est la représentativité des pixels de contrôle ? Combien de pixels doit-on contrôler ? Doivent-ils être indépendants de la phase d'initialisation ?

La représentativité des pixels de contrôle est tributaire de celle des segments. Ces derniers, nous l'avons vu, ont été disséminés sur la zone d'enquête par le tirage systématique. Si leur nombre est suffisant, la qualité de la répartition est assurée (cf. 6.1.). A l'intérieur des segments, nous avons eu recours à un deuxième tirage systématique. C'est donc un tirage à deux degrés qui nous fournit les points de contrôle. Tous les pixels tirés sont ensuite regroupés dans la matrice de confusion en fonction de leur affectation terrain et image classée.

La représentativité des pixels de contrôle comme celle des pixels d'initialisation est donc déterminée par la méthode de sondage. Il faut s'assurer que celle-ci a sélectionné suffisamment de segments d'enquête et que le tirage systématique, dans notre cas, les a correctement répartis.

¹BONIN 1983 p.44

La question du nombre de points de contrôle sera traitée d'une manière plus générale avec celle du nombre de points d'enquête nécessaires pour assurer une connaissance satisfaisante et représentative de la zone d'étude (cf. 6.1.1.).

Lorsque l'on effectue à l'intérieur des segments le tirage des points qui vont constituer l'échantillon de contrôle, doit-on rejeter les pixels qui ont servi à initialiser les traitements ?

Sur ce dernier point, lorsqu'il est évoqué, tout le monde s'accorde à dire qu'il ne faut pas autovalider la classification en la contrôlant avec des pixels qui ont servi à l'initialiser. Nous sommes parfaitement d'accord avec cette prise de position, mais signalons qu'à notre connaissance il n'existe aucune étude qui ait déterminé :

- la proportion optimale de points d'enquête à réserver à l'initialisation des traitements par rapport à celle destinée au contrôle ;
- l'importance du biais entraîné par l'utilisation d'une certaine proportion (à déterminer) de pixels d'initialisation parmi les pixels de contrôle.

Cet aspect gagnerait à être étudié pour homogénéiser les procédures et rendre comparables les méthodes de classification.

Pour notre part, nous conseillons de scinder en deux l'échantillon de segments. Le premier lot est utilisé pour sélectionner quelques parcelles d'initialisation (cf. 8.1.). Le deuxième sert au tirage systématique des points de contrôle (cf. 8.3.). La représentativité des deux lots est comparable dans la mesure où chaque segment, en raison de la méthode de tirage, a un symétrique qui lui est relativement proche géographiquement (cf. 6.1.). Les symétriques sont tout naturellement séparés et répartis dans chacun des deux échantillons.

Notons qu'en raison de la petite taille des zones d'enquête, le protocole décrit a dû subir quelques entorses (cf. 8.3.). Le nombre des segments était trop faible pour pouvoir être réellement scindé en deux. Le principe de la méthode reste toutefois valable.

Comme cela vient d'être exposé, le contrôle de la cartographie s'effectue à l'aide d'indices. La sélection proposée ici a été choisie pour son efficacité mais aussi pour sa simplicité de mise en œuvre. Elle permet au producteur et à l'utilisateur de la carte de connaître la précision globale du document ainsi que celle de chaque thème **au niveau des segments.**

En revanche, l'extrapolation des renseignements obtenus sur les segments à l'ensemble de la zone d'étude suppose qu'en plus soit connue la représentativité des points de contrôle. Il faut alors :

- disposer d'un échantillon de segments (enquêtés sur le terrain et dont on connaît la représentativité) que l'on a gardé en réserve pour le contrôle, avec les contraintes que cela suppose ;
- et/ou bénéficier d'observations indépendantes de l'enquête comme des photographies aériennes ou des résultats d'une autre étude.

En leur absence, toute inférence des résultats obtenus sur les segments vers la zone d'étude risque d'être une spéculation incontrôlable. A l'inverse, si l'échantillon est suffisamment bien réparti, les algorithmes de classification vont extrapoler de manière fiable les résultats des segments à l'ensemble de la zone d'étude.

Quoiqu'il en soit, le contrôle de la cartographie reste synthétique. Il permet généralement une connaissance globale et non locale du comportement des différents thèmes.

La cartographie, au même titre que les statistiques, fait partie intégrante du processus de valorisation de l'outil télédétection dans les enquêtes d'inventaire d'occupation du sol. Dans une première étape, grâce à des préclassifications, elle est une aide à la préparation de l'enquête de terrain. Elle permet de stratifier le paysage, d'individualiser les différents thèmes susceptibles d'être présents lors de la mission de terrain et aussi de les localiser. Ce sont les classifications non supervisées sur des documents satellitaires antérieurs à la mission de terrain qui remplissent ce rôle.

A l'inverse, les classifications supervisées vont être réalisées à l'issue de la mission de terrain. Car d'une part, on dispose maintenant de réalités de terrain. D'autre part, ce type de classifications génère moins de thèmes "fourre-tout" que les classifications non supervisées. Enfin, les algorithmes du type maximum de vraisemblance permettent de faire varier le seuil d'attractivité des différentes classes et donc de rapprocher le plus possible la classification des réalités de terrain en gérant au mieux les pixels mixtes.

On notera, toutefois, qu'il peut y avoir une très bonne adéquation numérique au niveau du segment entre la classification et les réalités de terrain, sans que pour autant celle-ci se réalise spatialement. Cet aspect est difficilement perceptible dans les estimations statistiques, qui ne prennent en compte que l'aspect numérique. En revanche, les indices de précision doivent permettre de déceler cette distorsion.

Il faut constater que le contrôle de la cartographie, quel qu'en soit le stade, ne se fait pas visuellement et qu'il n'existe pour le moment que des méthodes statistiques, comme les matrices de confusions, indices, etc., pour contrôler le document visuel qu'est la carte.

Nous concluons cette section en insistant sur la complémentarité des approches. Les formulaires statistiques fournissent l'estimation et sa précision au niveau de la zone d'étude, alors que les indices issus de la matrice de confusion sont destinés au contrôle de la conformité des classifications par rapport au terrain au niveau du segment.

Quel que soit le destinataire de l'étude, que ce soit un utilisateur final ou intermédiaire, celui-ci doit disposer de la documentation la plus pertinente et la plus performante. La valorisation de l'apport de la télédétection dans les enquêtes de terrain passe par l'utilisation conjointe des classifications et des statistiques d'occupation du sol. Toutes deux sont tributaires de la télédétection et dépendantes l'une de l'autre. L'estimateur de superficies ne peut être aussi précis que grâce à la classification. Quant à celle-ci, elle ne peut fournir d'évaluation de superficies sans la validation statistique du plan de sondage de l'enquête de terrain.

Ceci nous amène à la conclusion de ce chapitre, où nous avons successivement sélectionné la base de sondage (l'imagerie satellitaire SPOT sous sa forme numérique de préférence), puis les méthodes d'enquête et de contrôle associées à un inventaire d'occupation du sol.

En résumé, l'enquête est réalisée à partir d'un plan de sondage indépendant de la subjectivité de l'opérateur. Celui retenu relève des **méthodes aréolaires** pour être compatible avec la télédétection. Il est **systématique** pour assurer une bonne répartition de l'échantillon dans la zone d'étude et **non aligné** pour se dégager des problèmes de structures et périodes présents dans le paysage.

Bien que très performante dans le domaine de l'inventaire d'occupation du sol, **la télédétection ne peut se passer d'une phase d'enquête sur le terrain** (l'inverse est maintenant tout aussi vrai) relevant de la théorie statistique avec tout ce que cela implique dans le domaine de la représentativité des échantillons, car la télédétection n'est pas opérationnelle seule. Si elle l'était, une sélection de l'échantillon par choix raisonné serait suffisante. Pour chaque thème reconnu sur le terrain, une simple relation linéaire lui ferait correspondre son équivalent rigoureux sur l'image classée, et par extrapolation, sa superficie serait directement calculée sur la carte au niveau de la zone d'étude.

Comme nous l'avons démontré, et comme le rappelle J. Meyer-Roux¹ «*si la télédétection était réellement opérationnelle, cette droite de régression passerait par l'origine [du repère (cf. 4.3.1.)] (dans la réalité elle n'en passe jamais très loin).*», or il n'en est rien. Il n'y a pas de correspondance automatique entre le terrain et la télédétection mais seulement une possibilité d'évaluation rigoureuse de cette relation. De ce fait, il n'est pas possible d'estimer précisément les superficies à partir de la seule cartographie. Une enquête de terrain et des estimateurs rigoureux (par la régression dans notre cas) doivent lui être associés pour estimer les superficies des différents postes d'occupation du sol.

Tout au long de ce chapitre, nous avons évoqué le contexte scientifique qui régit les méthodes d'enquête pour l'inventaire d'occupation du sol. Bien que performantes, en théorie, dans tous les milieux, elles ont été mises au point pour l'élaboration des statistiques agricoles des pays développés. Il s'agit maintenant de déterminer dans quelle mesure il existe déjà des applications en milieu naturel tropical sec et dans quelles mesures elles satisfont à la problématique que nous venons de dégager. C'est le sujet du prochain chapitre où nous aborderons également les spécificités de la collecte des données pour un inventaire à vocation pastorale.

¹MEYER-ROUX 1981a p.14



5. INVENTAIRE EN ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES

La problématique méthodologique décrite au chapitre précédent est fondée sur des expériences tempérées et agricoles. Elle nécessite donc une acclimatation aux milieux arides et semi-arides de la zone tropicale sèche. Pour cela, il faut s'inspirer d'expériences ayant déjà eu lieu dans la même zone écoclimatique.

Ensuite, dans la mesure où cette méthodologie d'inventaire est plus particulièrement destinée à des agro-éleveurs, il convient d'analyser les spécificités de l'évaluation des productions pastorales pour les intégrer à notre propre approche de l'enquête.

5.1. BILAN DE QUELQUES EXPÉRIENCES

Les expériences qui vont être analysées ont été sélectionnées pour leur méthodologie d'inventaire et non pour le thème qu'elles inventorient. Le critère de sélection des exemples porte sur l'utilisation conjointe d'une enquête de terrain et de la télédétection. Ces expériences transcrivent différentes approches du milieu mais ne sont pas forcément représentatives des méthodes d'enquête pratiquées par la communauté des forestiers, des agronomes, des pédologues, etc.

5.1.1. Description de quelques méthodes d'enquête

Nous n'avons pas cherché, dans cette étude de cas, à donner une description exhaustive des thèmes ou des méthodes d'enquête présents dans les inventaires. Nous avons plutôt recherché quelques méthodes couramment pratiquées pour déterminer dans quelle optique elles étaient réalisées. Privilégiaient-elles plutôt la finesse de l'information, sa précision, sa représentativité, etc. ?

Pour réaliser cette comparaison, nous avons sélectionné deux critères représentatifs de l'état d'esprit avec lequel sont abordés ces inventaires. Ils vont nous permettre de dresser un panorama des méthodes et en définitive d'apprécier la fiabilité du résultat en fonction de la démarche scientifique.

Les deux critères retenus sont les suivants :

- méthodes de sélection des relevés sur le terrain ;
- méthodes de validation des résultats.

Nous sommes conscient d'introduire dans cet exposé une part d'arbitraire liée à notre sélection d'exemples. Il était difficile de procéder autrement. Il n'est pas question de retracer un historique ou une évocation chronologique, mais simplement de relater quelques pratiques et parfois leurs lacunes pour justifier notre démarche.

5.1.1.1. Choix de l'échantillon

Ce critère est presque partout décrit. Parmi les études récentes consultées, seul M. Mietton¹ n'apporte aucune précision sur la procédure de sélection des zones tests retenues dans son étude de la dégradation des sols en zone de savane du Burkina Faso. Il précise seulement que cette phase est capitale. Il rend ainsi impossible toute appréciation de la qualité de ses estimations de superficie sur les sols dégradés.

De nombreux auteurs décrivent la sélection de l'échantillon comme le résultat d'un choix raisonné, en fonction d'une représentativité appréciée par eux-mêmes ou d'autres, de l'accessibilité des sites, etc.

Lors d'une étude sur les pâturages au Botswana, S.D. Prince et W.L. Astel² ont sélectionné leurs 20 unités d'enquête par zone d'étude «... *in order to represent the major variation in the vegetation present.*». Ces unités de 200 mètres de côté seront quant à elles sondées systématiquement à raison de 30 placeaux chacune. Il n'est pas fait mention d'unité d'enquête sur des thèmes "non pâturables".

Dans leur étude sur l'évaluation des ressources fourragères au Sud-Tamesna (Niger), G. De Wispelaere et B. Peyre de Fabrègues³ ont sélectionné 25 parcelles par choix raisonné sur une stratification de l'espace en zones homogènes. Tout comme dans l'exemple précédent, chaque parcelle sera sondée systématiquement à raison de 36 placeaux chacune. Notons que la stratification a été réalisée à partir de travaux antérieurs et qu'il n'est pas non plus fait mention d'unités d'enquête sur des thèmes non pâturables.

L'analyse du milieu agricole ne relève pas d'une pratique fondamentalement différente chez C. Belem⁴ *et alii*. La délimitation des zones tests est réalisée sur les compositions colorées de manière à obtenir un équivalent terrain de toutes les taches colorées identifiées sur la visualisation. Il ne s'agit donc pas d'effectuer la sélection

¹MIETTON 1988 p.382

²PRINCE 1986 p. 1535

³DE WISPELAERE 1988 p. 9

⁴BELEM 1988 p.12

de l'échantillon par choix raisonné sur le terrain en fonction des différentes végétations mais de la réaliser sur les textures et structures des taches colorées.

L'optique du Bureau pour le Développement de la Production Agricole (BDPA) est un peu différente. Celui-ci, dans la phase recherche appliquée, encore appelée phase 1, de son Système d'Observation Statistique de Prévision Agricole par Télédétection (SOSPAT), a retenu un échantillon par choix raisonné à deux niveaux sur photographies aériennes¹. Le premier niveau est lié au choix de l'axe des prises de vue aériennes sur des cartes de reconnaissance. Le deuxième est attaché au choix des segments après analyse de la totalité des clichés.

Le BDPA justifie sa démarche en expliquant qu'il ne se place pas dans l'optique quantitative du sondage aréolaire mais dans une optique qualitative où «*on cherche plutôt à disposer d'un ensemble de références de terrain ayant une représentativité suffisante ...*» (!). De même, le BDPA précise que la taille du segment pourra être adaptée en fonction des conditions rencontrées sur le terrain, essentiellement pour des raisons de durée d'enquête.

La caractérisation de la surface des sols arides ne relève pas non plus forcément des méthodes aléatoires. Dans son étude sur les sols de la région de Tataouine, en Tunisie, R. Escadafal² sélectionne ses sites d'enquête en fonction des unités morpho-pédologiques présentes et après avoir stratifié le paysage sur photographies aériennes. Il estime ainsi qu'il peut assurer la qualité de son enquête, alors qu'avec une méthode aléatoire les contraintes matérielles l'en auraient empêché.

L'étude spatiale des phénomènes érosifs a conduit C. Malek³ à une procédure d'enquête un peu différente. Son analyse dynamique des milieux physiques de l'Oudalan, au Burkina Faso, par télédétection a été réalisée à partir de classifications non supervisées. La recherche des zones tests n'a pas pour but d'initialiser les traitements mais de donner une signification aux classes issues des seuls algorithmes, et d'en assurer le contrôle. Les sites tests ont été sélectionnés sur une simulation SPOT classée datant d'octobre 1981 dont le contrôle a été effectué au sol en même temps que le satellite réalisait les futurs enregistrements. Cette méthode reste de type choix raisonné, effectuée sur image classée, donc sur strate.

Enfin, plus rares sont les auteurs, ayant travaillé en milieu sahélien, dont la sélection de l'échantillon relève de la théorie des sondages (cf. 4.2.). Nous en avons pourtant retenu deux.

¹BDPA 1986 : 156-157

²ESCADAFAL 1989 : 207-211

³MALEK 1989 p. 82

Dans son inventaire des formations sèches, M. Pain-Orcet¹ *et alii* ont tout d'abord sélectionné 16 zones tests dans chaque domaine bioclimatique préalablement défini. Cette première sélection s'effectue sur des critères de représentativité et de logistique. Chaque zone test d'une quinzaine d'hectares constitue l'unité primaire d'un sondage à deux degrés. Sous cet aspect, même si le tirage des unités secondaires est systématique, nous sommes en présence d'un échantillonnage par choix raisonné.

En revanche, il est possible de considérer que chacune des 16 zones tests constitue un inventaire indépendant, à l'intérieur duquel un tirage systématique de placeaux d'enquête est effectué. Les auteurs ont pour partie utilisé cet artifice pour estimer les volumes de bois à l'intérieur des zones tests.

Conjointement à cette enquête, 37 parcelles ont été inventoriées dans le but de servir de vérité-terrain pour les zones d'entraînement de la classification. Les informations collectées sont d'ordre qualitatif et quantitatif, mais la méthode de collecte n'est pas précisée. Est-ce dans les placeaux tirés systématiquement, dans les zones tests, ou bien ailleurs ?

Le BDPA, dans la phase trois du projet SOSPAT², présente une évaluation des superficies cultivées par prise de vue aérienne basse altitude. Cette évaluation est effectuée par tirage systématique sur les photographies aériennes. Celles qui sont retenues dans l'échantillon sont analysées au moyen d'une grille de sondage. Les estimations des superficies cultivées sont fournies avec une estimation de la précision pour différents taux de sondage³. Enfin, une cartographie des surfaces cultivées et de l'état de développement des cultures est fournie. Il est donc pratiquement possible d'extrapoler à partir de ces documents les données de rendement pour la campagne 1987.

Cette étude par échantillonnage constitue d'une part la statistique des superficies cultivées pour l'arrondissement de Mayahi, Niger, mais aussi les réalités de terrain d'une étude sur imagerie SPOT dont, hélas, nous n'avons pas pu nous procurer les résultats. C'est pourtant une des études dont on peut supposer que la validation des résultats a été menée avec le plus de rigueur, en regard de la méthodologie présentée.

¹PAIN-ORCET 1989 p. 5

²BDPA 1988

³BDPA 1988 p.16

5.1.1.2. Validation des résultats

Pour servir de critère à cette étude sur la validation des résultats nous avons pris en compte toutes les méthodes, qu'elles soient statistiques ou cartographiques. Alors que la phase d'échantillonnage est pratiquement tout le temps évoquée, la phase de validation ou de contrôle est beaucoup plus rarement décrite.

Parmi ceux qui passent sous silence cet aspect essentiel de leur travail, nous retrouvons M. Mietton¹ mais aussi, C. Belem² *et alii*, le BDPA³ dans la phase 1 du projet SOSPAT, R. Escadafal⁴ et enfin C. Malek⁵. Ceux-ci, à des degrés divers, nous laissent ignorer leur méthode de contrôle. Il n'est jamais question dans leur travail ni de matrice de confusion sur les cartes réalisées, ni de précision sous forme d'intervalle de confiance, coefficient de variation, etc. pour les estimations de superficie présentées. Tout au plus laissent-ils entendre qu'il y a eu des contrôles effectués et que ceux-ci ont validé les résultats.

Il ne faut évidemment pas voir ces critiques comme des attaques personnelles. Il y a quelques années nous aurions probablement procédé de la même manière. En revanche, elles sont significatives de méthodes encore fréquemment utilisées en milieu tropical, alors que, comme nous l'avons vu pour le milieu tempéré, cela fait plus de dix ans qu'Américains et Européens publient une évaluation de leurs cartographies et donnent la précision de leurs statistiques.

Parmi les neuf exemples retenus, il s'en trouve trois pour présenter au lecteur, de façon plus ou moins développée, l'analyse des résultats ainsi que la méthodologie de contrôle.

G. De Wispelaere et B. Peyre de Fabrègues⁶ fournissent la précision de leur classification et la méthodologie utilisée pour le contrôle. Leur approche consiste à effectuer séparément le contrôle des thèmes non pâturables d'une part et des classes de biomasse d'autre part. Le tirage des points de contrôle pour les thèmes non pâturables a été réalisé par choix raisonné, puis des indices [Global, Kappa et Kappa "modifié"] ont été calculés.

En revanche, il ne leur a pas été possible de recourir aux matrices de confusion pour évaluer la cartographie de la partie biomasse. Il leur a en effet

¹MIETTON 1988

²BELEM 1988

³BDPA 1986

⁴ESCADAFAL 1989

⁵MALEK 1989

⁶DE WISPELAERE 1988 : 50-57

manqué, comme ils le précisent eux-mêmes, un second réseau de mesures de biomasse sur le terrain car les 25 sites d'enquête ont tous été utilisés pour initialiser les traitements. L'évaluation de la précision est semble-t-il donnée, au niveau des sites, par le calcul de l'écart moyen entre les mesures réalisées sur le terrain et les biomasses calculées sur les radiométries SPOT.

Bien que perfectible, essentiellement en regard de la représentativité numérique et géographique, la méthode de contrôle utilisée a au moins le mérite d'être décrite ; de nombreux auteurs n'en font pas autant. Elle permet de toute façon d'apprécier la relation qui unit biomasse mesurée et biomasse calculée, au niveau des sites, à défaut de le faire pour l'ensemble de la zone d'étude.

Le BDPA dans la phase trois de son projet SOSPAT a, comme cela a déjà été précisé (cf. 5.1.1.1.), utilisé une méthode d'enquête relevant de la théorie statistique pour évaluer les surfaces cultivées mais aussi pour évaluer à terme les rendements. En l'absence de cartographie autre que les cartes synthétiques publiées avec le rapport, l'évaluation des résultats repose sur la précision statistique qui caractérise l'estimation des superficies. Celle-ci permet au BDPA¹ d'analyser les différentes erreurs qui concernent ses résultats.

Parmi tous les travaux consultés, l'étude de M. Pain-Orcet *et alii* est la plus complète quant aux méthodes de contrôle. En effet, l'évaluation des résultats y est effectuée sur la cartographie et pour partie sur les statistiques.

Deux matrices de confusion sont présentées. Une première compare la classification et les données de terrain au niveau des zones d'entraînement. La seconde, qui est dédoublée, compare la même classification à une photointerprétation et cette fois au niveau de la zone d'étude. Ces matrices permettent d'apprécier la représentativité des échantillons, la précision thématique et la précision cartographique². En revanche, la sélection de l'échantillon n'est pas clairement expliquée.

Il n'y a pas de réelle évaluation des estimations de superficie par des méthodes statistiques comme cela a été décrit précédemment (cf. 4.3.), mais une étude de la précision de l'estimateur de volume de bois a été testée sur quatre stratifications différentes, sur l'indice de végétation SPOT, ainsi qu'en l'absence de stratification³. Cette démarche peut être rapprochée de celle d'une évaluation statistique des estimations de superficies. Nous considérons donc que cette étude allie au contrôle cartographique des résultats un contrôle statistique.

¹BDPA 1988 : 17-20

²PAIN-ORCET 1989 : 47-53

³PAIN-ORCET 1989 : 57-59

Nous n'avons pas pu citer les méthodes de contrôle utilisées par S.D. Prince et W.L. Astel¹ car ceux-ci se limitent à une évaluation de la corrélation entre biomasse et indice de végétation. Ils n'ont pas cherché à spatialiser leur recherche à l'échelle de la zone d'étude et n'ont donc pas de problèmes d'évaluation pour l'extrapolation spatiale de leur résultats.

L'absence d'exemple en provenance de la Food and Agriculture Organization (FAO) ou d'autres organismes internationaux n'est pas fortuite. Nous ne disposions pas en effet d'étude récente, et non généraliste, concernant notre domaine d'étude et émanant de ce type d'organisme. De ce fait nos exemples sont très hexagonaux dans leur provenance, nous en sommes conscient.

5.1.2. Critique des méthodes pratiquées en milieu aride et semi-aride

Ce paragraphe n'est pas destiné à porter un jugement sur telle ou telle étude mais plutôt sur la façon de pratiquer les inventaires en milieu aride et semi-aride. Bien que les critères retenus soient peu nombreux, ils sont significatifs d'un état d'esprit et des conditions dans lesquelles se déroulent les inventaires d'occupation du sol.

D'une manière générale, il est difficile de choisir plus de deux critères pour comparer et décrire les méthodes de travail. Nous avons dû nous en satisfaire car, comme nous l'avons vu, rares sont les auteurs qui acceptent de fournir un descriptif complet de la méthodologie utilisée.

Il convient d'ailleurs de s'interroger sur cette pratique qui ne peut que laisser libre cours à toutes les suppositions quant à la rigueur scientifique avec laquelle les travaux ont été réalisés. Nous n'avons pas, pour notre part, tranché cette question et pensons que quelles que soient les circonstances, la transparence doit être de règle, surtout lorsque l'on travaille dans une optique de transfert méthodologique.

A la suite de cette étude, trois groupes se sont individualisés :

- le premier est constitué par les inventaires pour lesquels le choix de l'échantillon des parcelles d'enquête s'effectue par choix raisonné et où le contrôle des résultats n'est pas explicitement mentionné ;

¹PRINCE 1986

- le second regroupe ceux dont les zones tests sont tirées aléatoirement, totalement ou pour partie, et pour lequel les procédures de validation des résultats sont décrites ;
- enfin, le troisième a une position intermédiaire, les unités d'enquête sont sélectionnées par choix raisonné mais la procédure de validation de la classification est décrite.

Schématiquement, le premier groupe se caractérise par des démarches strictement qualitatives. Seules, les superficies des différents thèmes sont recherchées, aucune quantification des productions n'est abordée. L'estimation des superficies repose sur un échantillonnage non probabiliste et d'une manière générale, les auteurs se contentent de méthodes assez succinctes.

En revanche, le deuxième groupe est caractérisé par des démarches quantitatives. Outre l'estimation des superficies par approche qualitative, ce groupe est caractérisé par la quantification d'un paramètre présent dans une ou plusieurs catégories d'occupation du sol. On peut citer comme exemple le volume de bois par hectare présent dans le thème forêt claire. Les exemples issus de ce groupe ont au moins pour partie une méthodologie proche de la théorie des sondages.

Enfin, le troisième groupe concerne les études portant sur les évaluations de pâturages. Du fait de leur besoin de quantifier la phytomasse herbacée aérienne, ces études devraient logiquement faire partie du deuxième groupe. Cependant, seule la validation des résultats les différencie des méthodes empiriques du premier groupe. Elles n'ont pas encore intégré dans leur protocole la sélection d'unité d'enquête par méthode représentative qui caractérise le deuxième groupe. Pourtant, c'est la seule façon pour elles de valoriser l'important travail de recherche mené sur l'évaluation des pâturages par satellite.

En conclusion de cette étude comparative sur les méthodes d'investigation en milieu aride et semi-aride, il apparaît que la rigueur scientifique de la méthodologie utilisée est liée au besoin de quantification d'un ou de plusieurs paramètres du paysage, rendement des cultures ou volume de bois pour l'essentiel. Les études concernant les productions agricoles et forestières sont donc celles qui sont menées avec le moins d'empirisme en regard des exemples cités.

Les productions fourragères n'intéressent peut-être pas depuis suffisamment longtemps les chercheurs en milieu tropical pour que ce domaine soit étudié avec la même rigueur. Elles accusent donc un certain retard quant aux méthodes d'enquête. Pourtant, la méthodologie développée dans ce mémoire, si elle est utilisée conjointement avec l'étude quantitative de la biomasse, devrait permettre d'accroître

la crédibilité de l'évaluation des pâturage par satellite, voire de l'inventaire pastoral en général. Il n'est peut-être pas inutile de rappeler les principales caractéristiques de cet inventaire en milieu tropical sec.

5.2. SPÉCIFICITÉS DE L'INVENTAIRE PASTORAL

Si le domaine agricole peut paraître assez simple à circonscrire (défrichements, cultures, jachères, etc.), il n'en va pas de même du domaine pastoral en milieu sahélien. Contrairement à l'agriculture, l'élevage ne laisse à peu près aucune marque dans le paysage, surtout vu d'un satellite. Tout au plus quelques traces de piétinement, quelques déjections, voire quelques parcs enclos d'épineux, appelés *zeriba*, témoigneront d'une activité d'élevage.

Pour délimiter le domaine pastoral, il faut donc faire référence aux autres composantes du paysage. Celles qui sont impropres à l'élevage doivent pouvoir être déduites de l'espace total et permettre ainsi par soustraction de déterminer l'extension du domaine pastoral, et peut-être l'activité dominante du secteur.

En fait, cette approche très théorique, permet cependant de constater que l'on ne retranche pratiquement rien de l'espace total, tout au plus quelques zones rocheuses inaccessibles et quelques surfaces toujours en eau. Le domaine agricole est ici considéré comme pâturable après la récolte ; il est de toute façon extrêmement restreint et ne constitue pas une dominante dans l'activité des populations de la zone d'étude (cf. 3.3.).

En conséquence et à quelques exceptions près, le domaine pastoral en milieu sahélien occupe tout l'espace. En revanche, à l'intérieur de ce domaine tout n'est pas pâturable. Il faut donc s'interroger sur les éléments constitutifs des pâturages sahéliens. C'est à cette question que doit répondre l'inventaire.

5.2.1. Finalité et niveau d'intervention

Il est important de rappeler que suivant l'échelle d'étude nous n'aurons pas la même perception de la relation qui unit la végétation et le milieu, qualitativement et quantitativement¹. Nous allons donc préciser notre niveau de "perception phyto-écologique" en fonction des objectifs à atteindre et de la résolution du satellite utilisé, ici SPOT.

¹LONG 1974 p.46

G. Long¹ a publié un tableau qui résume les différents niveaux de perception écologique. A l'aide de celui-ci, il est possible de situer le niveau d'intervention de notre inventaire. Celui-ci va de l'**élément de station écologique** au **secteur**, voire à la **région écologique**.

L'élément de station écologique aura dans notre cas une taille inférieure au pixel car : «*c'est enfin sur des éléments de station que sont effectuées les enquêtes de production les plus précises des milieux soumis à une exploitation forestière, pastorale ou agricole.*»². C'est l'équivalent de l'unité de prélèvement ou de compte, la placette, définie dans la mise au point terminologique (cf. fig. 0.2). Il ne sera donc pas représenté en tant que tel, mais comme un élément représentatif de la **station écologique**. Il faut noter que l'on n'enquête jamais une placette mais plusieurs qui peuvent être réparties sur l'ensemble de la station écologique.

La station écologique est «... *une surface où les conditions écologiques sont homogènes et où la végétation est uniforme.*»³. C'est l'équivalent de l'unité d'observation, la parcelle, sur laquelle s'effectue la description de la catégorie d'occupation du sol, d'un point de vue qualitatif (cf. 5.2.2.), lorsqu'elle est inventoriée sur le terrain.

Enfin, au-delà du secteur ou de la région écologique, la problématique devient quelque peu différente. En effet, dès lors que l'on dépasse la dizaine de milliers de kilomètres carrés, l'enquête de terrain et même l'utilisation de capteurs haute résolution n'est plus du ressort d'une équipe restreinte mais nécessite de plus gros moyens. Il faut dans ce cas réfléchir à une approche méthodologique spécifique.

On peut s'étonner qu'un géographe se réfère à un niveau de perception et une nomenclature essentiellement phyto-écologique et non à son équivalent géographique. A cela, il existe deux explications. La première est que cette recherche est menée pour satisfaire des aménageurs dont la formation est très souvent agronomique. Il est donc préférable d'adopter leurs références pour accroître les possibilités de pénétration de cette démarche méthodologique.

La deuxième explication tient au manque d'unicité de la nomenclature géographique qui selon les préoccupations du chercheur fait référence aux termes des climatologues, des pédologues, des ^{et de géo-biogéographes} géomorphologues, des botanistes, etc. A notre connaissance, en dehors de G. Bertrand, il n'y a pas eu beaucoup de tentatives pour réaliser une "synthèse du paysage". Ses niveaux de perception, axés sur les

¹ LONG 1974 p.48

² LONG 1974 p.58

³ LONG 1974 p.57

géosystèmes, géofaciès et géotopes¹, bien que très satisfaisants pour notre approche, comportent un inconvénient majeur à nos yeux, ils *sont difficiles de mise en oeuvre*. La nomenclature phyto-écologique nous est donc apparue comme la plus efficace, car accessible par le plus grand nombre d'interlocuteurs potentiels.

Comme cela a été démontré précédemment (cf. 4.3.), les classifications numériques sont indispensables dans notre analyse. De ce fait, nous limiterons l'étendue de notre inventaire en fonction des contraintes de taille imposées par la télédétection à haute résolution. Le niveau du secteur, voire de la région, écologique nous permet de toute façon de réaliser un inventaire pastoral à l'échelle de l'association pastorale. Cette contrainte n'en est donc pas une dans le cas présent.

Avant de définir les grands traits de ce que doit fournir un inventaire pastoral, il faut préciser que l'on ne s'intéressera ici qu'à ce que l'imagerie satellitaire peut détecter. Il n'est donc pas question d'analyser le cortège floristique par télédétection, tout au plus son étude sur le terrain servira à documenter les classes d'occupation du sol. De même, nous n'évoquerons pas l'étude de l'appareil racinaire ou du stock semencier pourtant primordiale pour les botanistes, ni même la micro-topographie des micro-faciès, etc.

5.2.2. Collecte des données et description d'un pâturage

G. Boudet² définit les pâturages tropicaux comme suit : «*les pâturages tropicaux sont constitués par des formations végétales naturelles ...*», il poursuit un peu plus loin, «*l'étude d'un pâturage est d'abord l'inventaire des espèces végétales, une appréciation de leur production potentielle en fourrage, et de leur réaction au facteur "broutage".*». Notons toutefois qu'en l'absence de point d'eau, naturel ou artificiel, il n'est pas possible de parler de pâturage pour une zone de végétation naturelle.

Le travail d'inventaire a donc pour but de déterminer quelles sont les formations végétales et de quelles espèces elles sont constituées. De plus, il doit déterminer le volume de fourrage disponible, la durée de cette disponibilité ainsi que les risques liés au surpâturage.

Avant d'envisager l'apport de la télédétection au travail d'inventaire, nous allons décrire synthétiquement les méthodes de collecte pratiquées. Puis, nous

¹BERTRAND 1968 p.256

²BOUDET 1984 p.45

envisagerons celles qui peuvent être intégrées à une démarche utilisant l'imagerie satellitaire, voire aux sondages spatiaux.

J. César¹ relate trois étapes dans la description de la végétation rencontrée. La première étape est qualitative, elle fait référence à la description de la structure générale des formations végétales. La seconde est semi-quantitative, elle décrit le cortège floristique. Enfin la dernière est purement quantitative, car elle ne fournit que ce qui est improprement appelée **biomasse**, la phytomasse aérienne herbacée. Notons, que d'une part, il n'est pas obligatoire d'effectuer ces trois étapes lors d'un inventaire pastoral, que d'autre part il n'y a pas d'ordre pour les effectuer.

Les mesures qualitatives et semi-quantitatives se font en règle générale au niveau de l'unité d'observation, la parcelle (station écologique), tandis que les mesures quantitatives se font plutôt au niveau de l'unité de comptage ou de prélèvement, la placette ou placeau (élément de station écologique). Il y a logiquement plusieurs placettes par parcelle pour assurer une certaine représentativité des mesures.

G. Boudet² indique que la description d'un pâturage relève d'une méthode d'inventaire issue de la phytosociologie. L'élément fondamental de cette méthode est le **relevé phytosociologique**. Celui-ci est effectué sur une station où les conditions écologiques et la végétation sont homogènes. Il ajoute que : «*la végétation du relevé est caractérisée par sa structure, sa répartition en strates et surtout par la liste des espèces végétales présentes sur la station (cortège floristique).*»³.

Pour compléter l'analyse du relevé, le stade phénologique de la végétation est en général précisé et très souvent un aperçu sommaire de la topographie et de la pédologie est ajouté.

Les descriptions qualitatives et semi-quantitatives ont lieu à l'échelle de la parcelle bien qu'elles ne soient effectives que sur une partie de celle-ci, l'**aire minimale du relevé**, à ne pas confondre avec l'aire minimale d'observation liée à la précision du positionnement sur le terrain (cf. 6.3.). L'aire minimale du relevé varie en fonction de la structure générale de la végétation et de la strate considérée.

La structure générale de la végétation fait référence aux types physiologiques établis à Yangambi⁴ pour définir les principaux types de végétation. Dans notre cas (cf. 3.2.), on parlera de steppe herbeuse, ou arbustive,

¹CESAR 1990 p.21

²BOUDET 1984 p.55

³BOUDET 1984 p.57

⁴TROCHAIN 1957

etc. Fréquemment, il est associé à cette typologie physiologique un nom de plante ligneuse ou herbacée (ex : steppe arbustive à *Acacia senegal* ou bien encore à *Aristida mutabilis*). Dans les deux cas, c'est une mesure *descriptive* : qui permet d'ajouter ce qualificatif ; la notion d'aire minimale du relevé prend tout son sens avec
des mesures quantitatives ou semi-quantitatives

Pour les ligneux, G. Boudet¹ préconise de déterminer l'importance relative des espèces les unes par rapport aux autres en prenant le quart d'hectare comme unité de comptage. L'abondance numérique et le recouvrement seront déterminés par espèce et par classe de hauteur. Une évaluation globale pourra bien sûr être établie.

Pour les espèces herbacées, il existe de nombreuses méthodes semi-quantitatives pour décrire la végétation d'un relevé. La plus courante est celle de l'échelle mixte d'**abondance-dominance**. Elle consiste à recenser toutes les espèces présentes et à leur affecter une cote en fonction de leur abondance, voire de leur recouvrement. Le système de cotation comporte 6 niveaux² :

- + espèce présente à l'état d'individus isolés (abondance et recouvrement très faibles) ;
- 1 espèce présente à l'état d'individus abondants, mais à faible recouvrement ;
- 2 espèce présente à l'état d'individus abondants, recouvrement voisin de 5 p.100 ;
- 3 espèce dont le recouvrement peut atteindre le tiers du relevé (5 à 35 p.100) ;
- 4 espèce dont le recouvrement occupe entre 1/3 et 2/3 du relevé (35 à 65 p.100) ;
- 5 espèce dont le recouvrement occupe plus des 2/3 du relevé (plus de 65 p.100).

Les résultats par espèce et par relevé sont consignés dans un tableau phytosociologique. Les ligneux et les herbacées seront toutefois séparés en deux tableaux distincts. Il est donc possible, en sommant le recouvrement de toutes les espèces herbacées présentes sur un relevé, d'approcher le taux de sol nu par relevé.

¹BOUDET 1984 p.58

²BOUDET 1984 p.59

Ce type de collecte est assez rapide à effectuer, mais le résultat est relativement subjectif car l'opérateur se déplace sur le relevé en fonction de son appréciation de l'hétérogénéité végétale.

Une autre méthode a les faveurs de la communauté scientifique, surtout lorsqu'il n'est pas nécessaire de quantifier la biomasse¹ : il s'agit des **points quadrats alignés**. Cette méthode, encore appelée méthode linéaire par point-contact, consiste à recenser régulièrement les espèces présentes, en général tous les 10 ou 20 cm, le long d'un décamètre tendu au-dessus du toit du tapis herbacé. Cela permet de déterminer la fréquence des espèces présentes et l'importance des sols nus.

La détermination du nombre d'observations, donc du nombre de lignes de points quadrats, est obtenue par calcul. Un intervalle de confiance est calculé après chaque nouvelle ligne inventoriée. Il prend en considération l'effectif cumulé de l'espèce dominante par rapport à l'effectif de l'ensemble des espèces². Une fois la précision attendue atteinte, le comptage est arrêté.

Parfois, la méthode des quadrats alignés est utilisée en association avec d'autres méthodes comme celle des transects ou celle des segments alignés. Car, bien qu'elle soit d'un aspect moins subjectif que la précédente, elle souffre toutefois des mêmes carences si la végétation est hétérogène et si cette hétérogénéité croît à mesure que la surface augmente.

Or, comme le fait remarquer J. César³ : *«le concept d'aire minimale suppose que le nombre d'espèces d'une formation (ou association) donnée est limité, c'est-à-dire que la courbe aire-espèce tend vers une asymptote dont l'ordonnée est le nombre maximal d'espèces, ou nombre d'espèces total.»*. Il ajoute cependant que de nombreux auteurs *«... ont montré que le modèle théorique de la courbe aire-espèce pouvait être une fonction de type logarithmique ou puissance, ce qui signifierait que le nombre d'espèces augmenterait indéfiniment avec la surface sans que l'on rencontre de discontinuité apparente.»*. Ne risque-t-on pas d'être obligé de faire un nombre important de lignes de points quadrats avant d'obtenir, dans le meilleur des cas, un intervalle de confiance satisfaisant ?

A titre indicatif, G. Boudet⁴ indique que la surface du relevé peut varier, en fonction de l'hétérogénéité du milieu, de 900 m² en savane à 2500 m² en steppe. Pour cette raison, dans le *Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures*

¹CESAR 1990 p.31

²BOUDET 1984 p.66

³CESAR 1990 p.30

⁴BOUDET 1984 p.59

*fourragères*¹, la méthode des points quadrats n'est utilisée que pour décrire l'évolution d'un pâturage vis-à-vis d'une ligne de points quadrats témoins, en général la même que quelque temps auparavant.

Notons, toutefois, que M. Grouzis² obtient, au Sahel du Burkina Faso, sur différents faciès et avec 250 points répartis en 5 lignes de 10 mètres, des précisions comprises entre 5 et 8 p.100. Il ne précise toutefois pas si ces très bons résultats sont obtenus avec les 5 lignes parallèles et très rapprochées (probabilité très forte d'une végétation plus homogène) ou si ces 5 lignes sont réparties au hasard dans la station (plus grand risque d'hétérogénéité).

Il ne précise pas non plus le temps passé à inventorier le cortège floristique par points quadrats. Or, cette technique peut être très coûteuse en temps, surtout si, comme le note J. César³, il est nécessaire de lui associer une abondance-dominance pour prendre en compte les espèces qui non pas été interceptées par la ligne. Il devient alors difficile de concilier finesse du relevé, dont l'objectivité reste à démontrer, et représentativité au niveau de la zone d'étude.

Comme nous venons de le voir, les méthodes semi-quantitatives sont loin d'être satisfaisantes, que ce soit d'un point de vue temps d'enquête ou d'un point de vue représentativité statistique du relevé. Bien que cet aspect ne soit pas primordial dans notre démarche, car on ne fait pas de détermination floristique par satellite, il convient cependant de dresser un inventaire pour renseigner la typologie issue de l'analyse qualitative des formations végétales. Notre choix se portera donc vers la méthode la moins coûteuse en temps, à défaut d'être la moins subjective, c'est-à-dire l'abondance-dominance.

Enfin, lorsque l'on aborde les mesures quantitatives, coupes de phytomasse herbacée aérienne par exemple, il n'est plus possible d'effectuer les prélèvements nécessaires à l'évaluation des potentialités pastorales sur la totalité de l'aire minimale. Il faut sélectionner un certain nombre de placeaux de quelques mètres carrés qui soient représentatifs du relevé. Les problèmes de représentativité évoqués pour l'analyse semi-quantitative vont donc se reposer pour l'évaluation de la production.

Il ne sera pas question ici des mesures quantitatives sur la phytomasse aérienne ligneuse, car d'une part nous ne les avons pas pratiquées, d'autre part il semble que ce sujet soit encore très mal cerné par les spécialistes. De ce fait, bien que nous soyons conscient de la nécessité d'évaluer le fourrage ligneux disponible,

¹BOUDET 1984 p.66

²GROUZIS 1988 p.50

³CESAR 1990 p.31

en raison de son importance dans l'alimentation du bétail, cet aspect restera pour le moment en suspens.

En raison du manque de représentativité de la plupart des études portant sur la quantification de la phytomasse herbacée, M. Grouzis¹ a évalué sur différents faciès la relation la plus performante, en termes de temps d'enquête et de précision, entre la surface de prélèvement et la taille de l'échantillon. La méthode de prélèvement utilisée est celle dite de **récolte intégrale**, où toute la matière végétale présente à l'intérieur du placeau est coupée au ras du sol. Des pesées avant et après dessiccation permettent d'obtenir la teneur en eau au moment de la récolte et le poids de matière sèche récoltée.

Il démontre que la solution la plus précise et la moins coûteuse est de répartir sur la parcelle 30 à 40 placeaux de prélèvements, d'une surface d'un mètre carré chacun, le long d'un transect². Un seul transect suffit s'il relate l'hétérogénéité de la parcelle.

Selon les milieux, il indique la précision obtenue pour 30 à 40 placeaux de 1 mètre carré. Elle est de 10 à 13 p.100 pour les groupements dunaires et les bas-fonds et de 20 p.100 pour les glacis. Il indique, par ailleurs, que sur les formations de glacis une précision de l'estimation de la quantité de biomasse de 10 p.100 nécessite un nombre de prélèvements pratiquement irréalisables avec cette méthode de récolte.

Des précisions analogues ont été obtenues au Niger³ et en Mauritanie⁴ avec des prélèvements non plus effectués le long d'un transect mais à l'intérieur d'un site de forme carrée de 60 mètres de côté, et à raison d'un tirage systématique aligné de 36 ou 25 placeaux (cf. fig. 5.1). Ce site est implanté au centre de la parcelle.

Suivant que l'on implante 25 ou 36 placeaux par site et suivant la densité de la végétation, le temps de collecte de la biomasse varie par site entre deux et trois heures. Il est donc assez logique de retenir comme base de calcul pour la quantification de la biomasse un temps de 2 h 30 mn. A cela, il faut ajouter environ entre un quart d'heure et une demi-heure pour la détermination du cortège floristique (ligneux plus herbacées). **Le temps total d'inventaire au niveau du site est alors d'environ trois heures.** Il n'est pas tenu compte ici des temps de liaison entre deux sites, ni des pesées effectuées après passage à l'étuve pour déterminer le poids de matière sèche. Il est donc difficile d'enquêter plus de deux sites par jour. Cette contrainte est un des freins majeurs pour obtenir une représentativité satisfaisante au niveau de la zone d'étude, nous y reviendrons (cf. 6.4.2.).

¹GROUZIS 1988 p.52

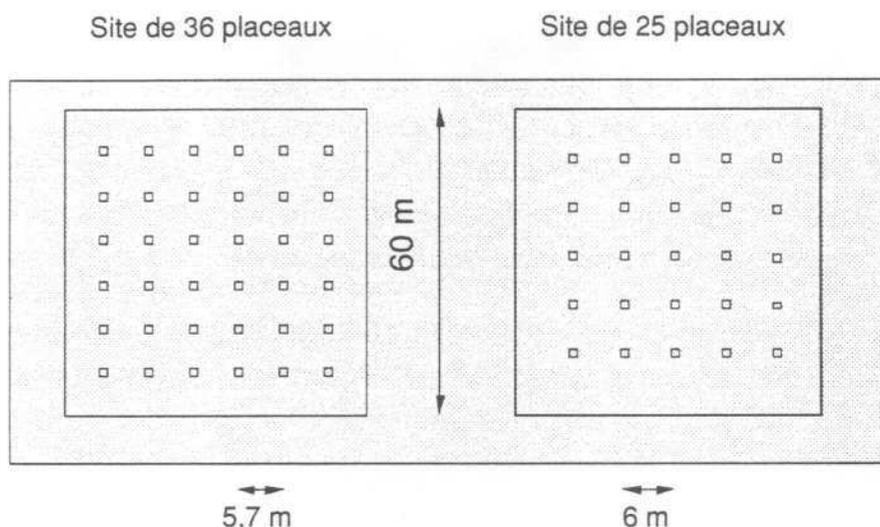
²GROUZIS 1988 : 59-60

³DE WISPELAERE 1988 p.19

⁴DE WISPELAERE 1989 p.88

figure 5.1 - Répartition des placeaux de coupe de biomasse

Tirage systématique aligné des placeaux de prélèvement



A la suite de ces collectes de données sur la végétation, qu'elles soient exclusivement qualitatives ou associées à des prélèvements quantitatifs, les phytosociologues, agrostologues et autres agropastoralistes ont à leur disposition une batterie de traitements pour analyser les caractéristiques phyto-écologiques de la zone d'étude. Les plus connus d'entre eux, après le quasi abandon de l'analyse visuelle par les matrices Bertin, sont les traitements par Analyses Factorielles des Correspondances (AFC).

Précisons simplement, sans nous étendre sur cet aspect qui déborde largement notre approche de l'inventaire pastoral, que ce type d'analyse permet aussi bien l'étude globale de la végétation que celle par groupe puis par sous-groupes pour en dégager les différents faciès caractéristiques.

Nous venons de voir, d'une manière synthétique, quels sont les principaux points abordés pour décrire un pâturage de manière traditionnelle, c'est-à-dire sans l'apport de la télédétection. Il convient maintenant d'analyser l'introduction de l'imagerie haute résolution dans ces inventaires, avec ses lacunes et ses atouts, et d'en évaluer l'apport.

5.2.3. Télédétection et inventaire pastoral

Le but de l'inventaire pastoral n'est aucunement modifié par l'apport de l'imagerie satellitaire haute définition, car il doit toujours, à terme, renseigner sur la

capacité de charge des parcours. Cependant, par certains aspects, la collecte des données va se trouver modifiée, les résultats aussi parfois, surtout en ce qui concerne la quantification de la biomasse.

Rappelons tout d'abord les impératifs de la collecte des données entraînés par la télédétection, quel que soit le milieu d'enquête. Comme le font remarquer Ph. Fournier et J.P. Gilg¹ : «... *la télédétection génère une nomenclature pour chaque date d'acquisition.*». De ce fait, il faut que l'enquête de terrain, ici aussi, soit simultanée à la date de prise de vue. Il doit y avoir la plus parfaite correspondance entre les données de terrain et les radiométries. Celles-ci doivent en être au même stade phénologique, ou au même stade d'inondation, de défrichement, etc.

Car, précisent-ils un peu plus loin, un même thème peut être séparé en différentes classes, ou bien plusieurs thèmes peuvent être regroupés dans la même classe, et cela en fonction du rayonnement électromagnétique qu'enregistre le satellite. Ce rayonnement dépend de la combinaison du moment entre les différents objets et leur environnement.

Par exemple, si la végétation est peu couvrante, le rayonnement perçu par le satellite sera encore la résultante des rayonnements végétation-sol, mais celle-ci sera très influencée par la dominante "sol" du signal. Alors que, quelques jours plus tard, le rayonnement peut être tout autre si la végétation a crû ou s'est desséchée. Il est donc très important de percevoir le paysage comme le satellite sur au moins quelques sites. Ce sera ensuite notre seule référence lors de la réalisation des classifications par zone d'égal raisonnement.

En raison de la variabilité spatiale des signatures spectrales liées aux facteurs d'environnement, les auteurs recommandent d'observer le terrain sous trois aspects :

- description selon une nomenclature prédéfinie, ce peut être celle de la structure générale de la végétation (analyse qualitative);
- enquête sur les propriétés des objets et leur environnement, ici la relation thème-substrat doit être précisée, qu'il s'agisse de la couleur du sol ou d'une inondation plus ou moins temporaire, etc. ;
- comptage sur des variables continues, telles que la biomasse (analyse quantitative).

Sur le premier point, il n'y a rien à ajouter par rapport au paragraphe précédent. La méthode d'analyse de la végétation reste valable, il s'agit d'une typologie relativement générale.

¹FOURNIER 1985 p.5

En revanche, l'analyse de la relation objet-environnement est une particularité introduite par la télédétection. Elle impose pour chaque relevé de végétation de déterminer son environnement. En pratique cela consiste essentiellement à déterminer la couleur du sol à l'emplacement du relevé. Cette couleur est liée à la composition de la couche superficielle du sol ainsi qu'à son humidité. En fonction du recouvrement de la végétation, ces paramètres peuvent s'avérer prépondérants dans le rayonnement perçu par le satellite. Plus les dates d'enregistrement et de passage sur le terrain seront éloignées, plus la relation végétation-environnement sera difficile à maîtriser.

Parfois d'autres phénomènes peuvent venir modifier le signal électromagnétique venant du sol. Il peut s'agir par exemple, de la présence à terre de débris végétaux plus ou moins décomposés datant d'une année antérieure, etc. Si le phénomène est important au niveau de la zone d'étude, il est préférable de l'avoir perçu et analysé pour en tenir compte dans la classification et les statistiques.

Bien qu'il existe de nombreux travaux sur la relation couleur des sols/réflectance spectrale, R. Escadafal¹ note qu'aucune loi générale n'a pu s'en dégager. Comme chaque site semble être un cas particulier de ce point de vue, il apparaît indispensable de contrôler, lors du passage sur le terrain, la couleur du substrat et son humidité. En effet, cela peut permettre lors des traitements de comprendre certaines anomalies de classification telles que la répartition dans différentes classes d'un même groupement végétal ou bien encore la composition d'une classe "fourre-tout".

Notons toutefois que la comparaison des couleurs de sols d'un site à l'autre est très complexe, voire peu fiable, que ce soit *in situ* ou en laboratoire. En effet, cette analyse est rendue complexe par l'instabilité chromatique des émulsions photographiques et des tirages d'imprimante à la chaleur et surtout à la lumière.

Pour l'analyse de la couleur des sol, nous utilisons un atlas des couleurs dit **système Munsell** qui organise les couleurs en teinte, intensité et saturation. Il suffit de comparer sur le terrain la couleur du sol à celle des planches de l'atlas. Cet atlas propose pour chaque teinte différentes combinaisons d'intensité et de saturation. Nous avons pour notre part toujours prélevé, à l'aide d'un ruban adhésif transparent, un échantillon superficiel du sol, qui collé dans le cahier de relevés permet un contrôle ultérieur en laboratoire.

L'humidité superficielle du sol est appréciée de façon plus sommaire. Quatre classes sont décrites : sec, trace d'humidité, imprégné, couvert.

¹ESCADAFAL 1989 p.153

Enfin le troisième point, comptage des variables continues, est probablement le plus transformé par l'utilisation de la télédétection, et cela sous de nombreux aspects.

Nous avons vu précédemment (cf. 4.3.), à partir de critères qualitatifs (classes d'occupation du sol), qu'il était possible d'extrapoler à l'ensemble de la zone d'étude une classification établie sur des zones tests représentatives. Cet aspect vaut aussi pour des critères quantitatifs comme l'évaluation de la biomasse. Donc à partir de quelques sites-échantillons, il est possible d'évaluer le potentiel fourrager d'un secteur pastoral dont on possède un enregistrement satellitaire pour une date convenable (cf. 3.2.). La représentativité de l'échantillon devra, ici aussi, être établie avec rigueur pour valoriser un travail de terrain long et fastidieux.

En effet, les méthodes quantitatives et semi-quantitatives (cf. *supra*) sont très longues à mettre en œuvre. De ce fait, il n'est souvent réalisé qu'un nombre restreint de relevés. Ceux-ci s'avèrent en général non représentatifs de la zone d'étude. Dès lors une extrapolation des zones tests à l'ensemble ne peut pas être considérée comme fiable. Il s'agit de déterminer quelles sont les méthodes de collecte qui limitent le temps consacré au prélèvement et permettent d'accroître le nombre des sites enquêtés.

Depuis les années 1970 et les premiers satellites d'observation de la terre, de nombreux travaux ont fait valoir l'intérêt pour la communauté scientifique d'utiliser le comportement spécifique de chaque type de couvert vis-à-vis du spectre électromagnétique. Dans notre cas particulier, c'est la corrélation positive entre phytomasse et longueur d'onde du proche infra-rouge qui est la plus intéressante. Elle permet, après étalonnage avec des productions mesurées sur le terrain, de déterminer des classes de phytomasse par niveau de réflectance¹.

En raison de la durée des opérations "traditionnelles" de quantification de la biomasse (coupe, pesée matière verte puis sèche, etc.), quelques chercheurs ont essayé d'utiliser les propriétés de la télédétection pour limiter le temps passé par site, et en accroître le nombre. Cette procédure radiométrique comporte toutefois quelques contraintes.

Comme le souligne M. Grouzis² : «*la méthode radiométrique est donc applicable à la végétation spontanée plurispécifique sahélienne, à condition de satisfaire aux exigences suivantes : opérer par temps serein, normaliser les valeurs en fonction de la hauteur du soleil ou opérer pendant la période correspondant au palier, étalonner préalablement l'appareil.*».

¹DE WISPELAERE 1988 p.42

²GROUZIS 1988 p.79

Dans l'ordre et d'un point de vue pratique, ces exigences signifient qu'il faut travailler dans des conditions analogues d'un site à l'autre et avec un ciel dégagé, pour bénéficier d'un rayonnement solaire constant. Pour les mêmes raisons, les mesures avec radiomètre se feront toujours de 10 heures à 14 heures solaires. Enfin, l'étalonnage des radiométries se fera sur différents types de végétation à différents stades phénologiques. De même, en complément de ces mesures radiométriques, un calibrage sur des objets radiométriquement stables, en général des surfaces minéralisées sèches, doit être envisagé¹.

Dans le cas d'une étude sur le disponible fourrager en début de saison sèche, G. De Wispelaere et B. Peyre de Fabrègues² ont retenu cinq groupes typologiques combinant les types de végétation et les stades phénologiques. A titre d'exemple, on trouve le groupe des "Non graminiformes rampantes", dans lequel il y a *Citrullus colocynthis*, le melon de brousse, ou bien encore le groupe des "Graminiformes mésophiles" à *Cenchrus biflorus*, le cram-cram, etc.

Chaque groupe, dont l'intérêt pastoral, la production et le comportement radiométrique sont différents, va être l'objet d'une étude séparée. Un étalonnage sur chacun d'eux est réalisé. Ensuite, lors de l'inventaire de chaque nouveau site, on contrôle si le groupe auquel il se rattache a déjà été étudié. Si ce n'est pas le cas, une étude avec coupe, pesées et mesures radiométriques est entreprise pour étalonner le nouveau groupe. Dans le cas contraire, il n'est plus nécessaire de procéder à la coupe et aux pesées, le site est directement quantifié par le radiomètre.

En laboratoire, la valeur radiométrique du site sera convertie en quantité de matière sèche. Cette conversion s'effectue schématiquement de la manière suivante. Une droite de régression est calculée entre les biomasses mesurées par coupe et pesées et les radiométries correspondantes, et ceci pour chaque groupe³. La quantité de biomasse qui correspond aux mesures radiométriques de terrain est déterminée par calcul en utilisant l'équation de la droite qui concerne son groupe de rattachement.

M. Grouzis⁴ a évalué le gain de temps apporté par cette méthode. Il considère qu'il suffit d'une demi-minute par plateau pour effectuer une mesure radiométrique, alors qu'il en faut cinq pour effectuer la coupe intégrale de 0,25 m². Notons qu'en Mauritanie, nous effectuions la coupe des plateaux de 1 m² en cinq minutes également. C'est probablement plus la différence de densité de la végétation que la qualité de la coupe qui en est la cause.

¹DE WISPELAERE 1991

²DE WISPELAERE 1988 p.28

³DE WISPELAERE 1988 p.29

⁴GROUZIS 1988 p.79

Il poursuit en indiquant que l'étalonnage du radiomètre prend environ 2 h 45 mn pour 30 placeaux caractéristiques d'un groupe végétal (coupe, pesées et radiométries). L'étalonnage ne produit donc pas une surcharge en temps considérable pour la méthode de la récolte lorsqu'on lui associe les mesures radiométriques. En revanche le gain de temps va être très net dès lors que, le groupement étalonné, on n'opérera plus que par radiométrie : *«l'application de cet étalonnage à cinq sites du même groupement demande 1 h 15 mn alors qu'il en faudrait 15 pour avoir le même résultat par la méthode de la coupe, si l'on ne tient pas compte du temps nécessaire aux manipulations de séchage des échantillons.»*¹.

Bien que très intéressante, cette approche de la production pastorale par les radiométries comporte quelques limites. De nombreux auteurs ont travaillé sur le sujet, mais très peu ont été jusqu'à tester de manière opérationnelle l'évaluation de la production fourragère par télédétection. Les limites que nous indiquons sont reprises des travaux réalisés au Niger² par l'équipe qui à notre connaissance a été le plus loin dans cette voie.

A un niveau global, tous groupements confondus, l'erreur entraînée par cette méthode de collecte est légèrement supérieure à 20 p.100, par rapport à la récolte intégrale seule. D'une manière générale, les erreurs sont faibles pour les productions moyennes et un peu plus fortes pour les productions extrêmes (faibles ou fortes) en raison de l'usage de régressions linéaires.

Enfin, cette méthode est plus performante lorsque les mesures de radiométrie, terrain et satellitaire, sont réalisées sur une végétation non sénescente et lorsque le site ne comporte pas de groupements végétaux en mélange.

Il existe d'autres méthodes dont le but est de réduire les temps de prélèvement liés à la quantification. Les plus intéressantes sont probablement les méthodes par **double échantillonnage**. Il s'agit en général d'effectuer une partie de l'inventaire de manière visuelle, recouvrement de la végétation et production, puis de comparer avec des données collectées de manière traditionnelle.

B. Wylie³ *et alii* ont procédé de la façon suivante au Niger. Sur des sites de 10 km de côté, ils travaillent avec NOAA, 180 placeaux sont estimés visuellement. Tous les 10 placeaux, l'un d'entre eux est récolté par méthode intégrale. Une régression au niveau de chaque site est effectuée pour calibrer les estimations visuelles. Le coefficient de détermination (r^2) permet de contrôler l'intérêt de la

¹GROUZIS 1988 p.79

²DE WISPELAERE 1988 p.28

³WYLIE 1988 : 6-7

méthode, c'est-à-dire de déterminer dans quelle mesure les biomasses calculées par récolte intégrale sont bien expliquées par celles estimées visuellement¹.

En regroupant les années 1986 et 1987, soit pour 46 sites, le coefficient de détermination par site est compris entre 58 et 96 p.100, mais pour 83 p.100 des sites la variance est expliquée par cette relation à plus de 75 p.100. Cela signifie que dans 83 p.100 des cas, l'estimation visuelle est comparable en précision à celle par radiomètre, toutes choses égales par ailleurs.

Comme pour la méthode par radiométrie, les erreurs se font surtout sentir sur les productions extrêmes. De ce fait, les auteurs ont accru les contrôles sur les fortes productions, à raison d'une récolte intégrale pour cinq visuelles, alors que dans un même temps ils n'en effectuaient plus que un sur onze pour les faibles productions².

En revanche, nous ne savons rien, à la lecture de ce rapport, sur le temps consacré à l'enquête. Comme, nous n'avons pas nous-même expérimenté cette méthode visuelle, il nous est difficile de chiffrer le gain réalisé par rapport à la coupe intégrale. Cependant, même si l'on tient compte de la période de rodage nécessaire à l'opérateur, pour qu'il se familiarise avec la végétation et l'estimation de ses paramètres, cette méthode nous paraît quand même très intéressante. Son intérêt est surtout fonction de la motivation de l'opérateur. A tel point que dans l'ouest australien, les éleveurs font eux-mêmes l'estimation de la production de leur pâturage avec une méthode analogue. Les services de l'agriculture de l'état du Western Australian ont d'ailleurs publié un manuel accompagné d'un logiciel destiné à l'évaluation des pâturages par les éleveurs³.

De même, en l'absence de radiomètre, l'évaluation par double échantillonnage est à préférer à une quantification par récolte intégrale seule. Le gain de temps réalisé doit permettre, en enquêtant plus de sites, de compenser une précision légèrement moindre de l'évaluation.

Nous avons constaté que la rigueur scientifique qui accompagne les travaux d'inventaire en milieu aride et semi-aride, est fonction du besoin de quantification de certains paramètres. Dans le cas des inventaires pastoraux, seule la quantification de la phytomasse aérienne herbacée est actuellement opérationnelle par télédétection. La quantification de la phytomasse aérienne ligneuse par télédétection se heurte encore actuellement à de trop nombreux obstacles pour dépasser le stade de la

¹WYLIE 1988 : 9-10

²WYLIE 1988 p.7

³ORSINI 1989

recherche en zone sahélienne, alors qu'en zone soudano-guinéenne de très bons résultats ont déjà été obtenus¹.

Dès lors que comme critère de rigueur scientifique, on cherche avant toute chose à établir la représentativité spatiale de l'échantillon, il faut sélectionner parmi les méthodes traditionnelles d'inventaire pastoral non pas celles qui semblent les plus fines localement mais celles qui assurent la vision la plus homogène de l'ensemble du paysage. On favorisera donc les méthodes de collecte, semi-quantitative et quantitative, les plus rapides à mettre en œuvre, même si parfois leur précision est moins grande.

De ce fait, le comptage ligneux visera surtout par site à déterminer le recouvrement global. En fonction de la densité apparente, un comptage des individus sera effectué par espèce et par classe de hauteur. Puis pour chaque groupe, le recouvrement moyen sera évalué, il permettra de déterminer celui de la station.

Le cortège floristique sera évalué par abondance-dominance pour la partie semi-quantitative, le rapport délai de réalisation/précision lui étant nettement favorable. Enfin, la quantification de la biomasse sera effectuée^{est} par mesure radiométrique après étalonnage,^{not} par double échantillonnage si l'opérateur connaît la végétation et est motivé par le travail, ou bien encore si l'équipe ne dispose pas de radiomètre.

Il nous reste maintenant à voir comment les particularités de l'inventaire pastoral peuvent s'intégrer aux méthodes aréolaires définies au quatrième chapitre.

¹DEFOURNY 1989

6. MISE EN PLACE DU SONDAGE

Nous avons établi lors des deux précédents chapitres les préalables indispensables pour mener à bien d'une part un inventaire d'occupation du sol, d'autre part un inventaire pastoral à l'aide de la télédétection et des enquêtes de terrain. Nous allons maintenant définir la mise en place pratique de l'échantillonnage spatial en milieu naturel sahélien et envisager les modalités d'une intégration de l'inventaire pastoral dans cette approche méthodologique.

Les principaux points qu'il nous reste à développer sont les suivants : le nombre et la taille des points d'enquête en fonction du milieu, leur répartition, les problèmes de localisation en milieu naturel et enfin les spécificités purement pastorales.

6.1. NOMBRE ET RÉPARTITION DES UNITÉS D'ENQUÊTE

Il existe de nombreux estimateurs pour déterminer la taille théorique d'un échantillon. Certains sont issus des méthodes d'enquête "classique", sans la télédétection, d'autres ont été développés ou adaptés à l'imagerie satellitaire. Nous allons en analyser quelques-uns et tenterons de déterminer les plus adaptés à notre problématique d'inventaire.

6.1.1. Quelques estimateurs

Il convient tout d'abord d'effectuer trois remarques. Lorsque la population est très grande, il est communément admis que la taille de l'échantillon est à peu près indépendante de la population observée¹, cela ne va pas sans poser de problème avec certains estimateurs. La taille de l'échantillon intervient cependant dans la précision des résultats. Ph. Brion² indique d'ailleurs qu'il est préférable de raisonner en nombre d'unités enquêtées plutôt qu'en taux de sondage. Toutefois, nous verrons qu'au moment de la mise en place du tirage, le taux de sondage est d'une aide précieuse. Enfin, il est bon de rappeler que dans la pratique le nombre des unités d'enquête dépend en grande partie du temps dont on dispose tant en préparation que sur le terrain.

¹GOURIEROUX 1981 p.12

²BRION 1982 p.12

6.1.1.1. Présentation

Nous avons vu que pour tout échantillon, il existe une erreur d'échantillonnage (cf. 1.3.). Or, la plupart des estimateurs utilisés pour définir la taille d'un échantillon font référence aux lois de probabilité. Cela signifie que lorsque le tirage est effectué aléatoirement, il est possible de connaître le risque d'erreur aléatoire¹, c'est-à-dire l'erreur d'échantillonnage qui lui est attachée. On pense alors pour calculer l'effectif de l'échantillon à enquêter à utiliser le très classique :

$$m = \frac{t_{\alpha}^2 * S^2}{E^2}$$

où m est l'effectif de l'échantillon ; t_{α} la statistique de Student au seuil α choisi pour ∞ degré de liberté ; S^2 l'estimateur de la variance de l'échantillon et E l'erreur maximale tolérée par l'utilisateur.

Cet estimateur a été développé pour des échantillonnages "classiques", c'est-à-dire pour évaluer directement à partir de la variable enquêtée le nombre d'échantillons nécessaires pour atteindre une précision donnée. C'est, par exemple, la variabilité des différentes mesures de production pour un même pâturage qui permet de déterminer le nombre d'individus m indispensables pour atteindre une précision donnée (cf. 5.2.2.).

En revanche, dans le cas de la télédétection, cette évaluation se fait indirectement. On essaye de déterminer la variabilité thématique à partir de la variabilité d'une variable continue, les valeurs spectrales enregistrées par le satellite. Cette estimation se heurte à deux obstacles. Quel canal ou néo-canal est le plus apte à rendre compte de la relation qui existe entre les différents niveaux radiométriques et les différents thèmes ? Est-ce celui qui a la plus forte variance ou celui qui est le plus pertinent pour la recherche menée ?

De même, comment déterminer l'erreur maximale tolérée par l'utilisateur ? Celui-ci cherche à estimer la superficie des différents thèmes à plus ou moins ϵ hectares près. Comment évaluer en niveau de radiométrie cette précision absolue évaluée en hectares ? A notre avis, il n'y a pas de règle simple qui le permette.

La solution que nous avons retenue utilise non plus la précision absolue mais la précision relative pour déterminer l'erreur maximale tolérée E . Dès lors, on n'utilise plus la variance mais le Coefficient de Variation (CV) pour calculer la taille

¹CHADULE 1986 p.56

de l'échantillon. Pour cela M. Deroo et A.M. Dussaix¹ proposent la formule suivante :

$$m = \frac{4 M CV^2}{(M - 1) pr^2 + 4 CV^2}$$

où M est la population totale du fichier satellitaire, pr la précision relative et 4 l'approximation de la distribution du t de student pour un risque de 5 p.100. Notons que la précision relative et l'erreur maximale tolérée (formule précédente et suivante) sont synonymes dans le cas présent.

Les résultats proposés dans le tableau 6.1 regroupent des valeurs de coefficients de variation obtenus sur différents canaux et des valeurs de coefficients de variation théoriques (20, 50 et 100 p.100).

Sur les quatre zones d'étude testées et pour cinq canaux et néo-canaux, les coefficients de variation sont compris entre 7,4 et 15 p.100. Le nombre de points d'enquête déterminés par cette méthode est donc relativement faible. Pour relativiser cet aspect, nous avons d'ailleurs ajouté la valeur du "m" pour des valeurs théoriques de coefficients de variation non atteintes sur nos images.

tableau 6.1 - Taille de l'échantillon en fonction du coefficient de variation

	XS1 El Fa'Iya	IV Rosso	XS2 Lekseïba	Valeurs théoriques		
pr	CV 7,4 %	9,8 %	15 %	20 %	50 %	100 %
5 %	9	15	36	64	400	1600
10 %	2	4	9	16	100	400
20 %	1	1	2	4	25	100

La taille de l'échantillon est calculée au seuil de probabilité $\alpha = 95$ p.100.

Le chercheur aura donc intérêt à utiliser le canal au plus fort coefficient de variation pour déterminer le nombre de points d'enquête, voire peut-être même un coefficient de variation calculé sur la composition colorée. En effet, la combinaison des canaux accroît légèrement la valeur de celui-ci. A titre d'exemple pour la composition colorée standard de Rosso, le coefficient de variation vaut 20,4 p.100. Le nombre de points d'enquête m correspondant est alors de 16 pour une précision relative de 10 p.100 et un seuil de probabilité de 95 p.100. Ce nombre reste relativement faible, surtout si la zone d'étude est importante.

¹DEROO 1980 p.59

Bien que destiné à l'origine à un échantillonnage "classique", cet estimateur semble en théorie et sous certaines conditions pouvoir s'appliquer à la télédétection. Ses résultats seront discutés aux points suivants avec ceux des autres estimateurs (cf. 6.1.1.2.).

Le précédent estimateur est déterminé sur une variable continue, les valeurs spectrales, mais il peut être plus intéressant, voire plus simple, d'utiliser les proportions liées à des variables discrètes, les différents thèmes. Lorsque l'on cherche la proportion d'une certaine catégorie de territoire, en fonction de sa présence ou de son absence dans le paysage, la distribution de cette proportion suit une loi de probabilité dite de **distribution binomiale**. G.W. Snedecor et W.G. Cochran¹ indiquent que la taille de l'échantillon nécessaire pour ne pas dépasser l'erreur maximale tolérée, encore appelée erreur limite E, est alors :

$$m = \frac{2^2 * p q}{E^2}$$

où m est la taille de l'échantillon ; t prend la valeur 2 comme défini précédemment pour un risque de 5 p.100 (cf. *supra*) ; p est la proportion d'une certaine catégorie de territoire et q son complémentaire [q=(1-p)] ; et enfin E l'erreur maximale tolérée. Notons que E, p et q doivent être exprimés dans la même unité.

Bien souvent, on étudie plusieurs variables d'une même zone d'étude. Il est alors recommandé d'analyser séparément le nombre d'échantillons m de chacun des thèmes les plus importants², puis de retenir la valeur de m la plus forte. En cas de doute, on a de toute façon intérêt à se mettre dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire prendre p égal à 50 p.100.

tableau 6.2 - Nombre d'unités d'enquête (méthode binomiale)

E	p en %	10	20	30	40	50
10 %		36	64	84	96	100
20 %		9	16	21	24	25

Le tableau 6.2 indique pour quelques valeurs de p le nombre d'échantillons à enquêter pour une erreur maximale de 10 et 20 p.100 au seuil de 5 p.100³.

¹SNEDECOR 1971 p.575

²SNEDECOR 1971 p.576

³DEROO 1980 p.66

Cependant, lorsqu'il y a plusieurs catégories d'occupation du sol, M.L. De Keersmaecker¹ propose de recourir aux formulaires prenant en compte les **distributions multinomiales**. L'estimateur qui utilise les lois de la distribution multinomiale a été élaboré par R.D. Tortora², sa formulation est la suivante :

$$m = \frac{\chi_{1; 1 - \frac{\alpha}{k}}^2 * p_j (1 - p_j)}{E^2}$$

où χ^2 est la statistique du khi² à un degré de liberté au seuil α choisi et pour k catégories ; E est l'erreur maximale admise par l'utilisateur ; p_j la proportion de la catégorie de territoire la plus proche de 50 p.100.

Très proche du précédent, cet estimateur nécessite lui aussi, d'avoir une connaissance même approximative des statistiques d'occupation du sol, en l'occurrence, le nombre et la taille des différents thèmes. Il existe au moins deux possibilités pour obtenir les paramètres k et p_j .

tableau 6.3 - Nombre d'unités d'enquête (méthode multinomiale)

Nombre de classes]1,3]	[4,6]	[7,10]	[11,20]	+ de 21
Valeur du χ^2 à un ddl		3,84	5,41	6,64	7,85	10,83
Erreur maxi tolérée	10 p.100	96,0	135,3	165,9	196,2	270,7
	20 p.100	24,0	33,8	41,5	49,1	67,7

Les valeurs du Khi² sont lues dans les tables sauf pour la catégorie des [11,20] classes où elles sont interpolées. Cette valeur est calculée pour un degré de liberté (ddl).

Avant l'usage de la télédétection, dans un inventaire "classique", on avait recours à une photointerprétation pour évaluer ces paramètres. Il est toujours possible de pratiquer ainsi, mais avec les données numériques issues de l'imagerie satellitaire, il est maintenant possible de procéder par classification automatique. Celles-ci sont de types centres mobiles, ou nuées dynamiques dans notre cas (cf. 4.3.). Elles permettent de dégager rapidement des "formes fortes" (groupes radiométriques très stables), donc le nombre et la proportion des différentes classes à une date donnée (cf. 7.1.).

¹DE KEERSMAECKER 1987 p.201

²TORTORA 1978 p.101

Le tableau 6.3 est donné pour une proportion p_j fixée à 50 p.100 et un seuil de probabilité α de 95 p.100. Nous présentons donc plusieurs effectifs en fonction du nombre de classes k , de 1 à plus de 21 en les regroupant pour une même valeur de khi^2 , et en fonction de deux seuils d'erreur maximale tolérée, toujours 10 et 20 p.100.

Les estimateurs utilisés en présence de distributions binomiales ou multinomiales sont couramment proposés dans les inventaires "classiques". Ils s'adaptent aux données satellitaires dans la mesure où celles-ci ont préalablement été discrétisées en classes d'occupation du sol. La discussion qui suit cet exposé permettra de déterminer la pertinence de ces estimateurs en regard de notre problématique d'inventaire.

Pour ceux qui souhaitent utiliser les variables continues contenues dans les canaux bruts, K.A. Kershaw et J.H.H. Looney¹ proposent une méthode itérative et visuelle initialement destinée aux prélèvements de végétation. Elle s'applique relativement aisément aux valeurs spectrales. Nous verrons aussi plus loin son efficacité.

Il s'agit de tirer au hasard des valeurs radiométriques sur lesquelles on calcule la moyenne des cinq premiers individus de l'échantillon, puis des dix premiers, puis des quinze premiers, etc. Ces moyennes successives sont portées sur un graphe. Lorsque la courbe qui relie tous ces points cesse de fluctuer, la taille de l'échantillon d'enquête est déterminée (cf. figure. 6.1).

Notons qu'il est fréquent de tirer plus d'une centaine d'échantillons de valeurs spectrales pour visualiser le seuil déterminant le nombre de points d'enquête. La sélection du seuil est en général facilitée par l'utilisation du canal renfermant la plus grande variance, bien que par ailleurs il maximise le nombre d'unités d'enquête.

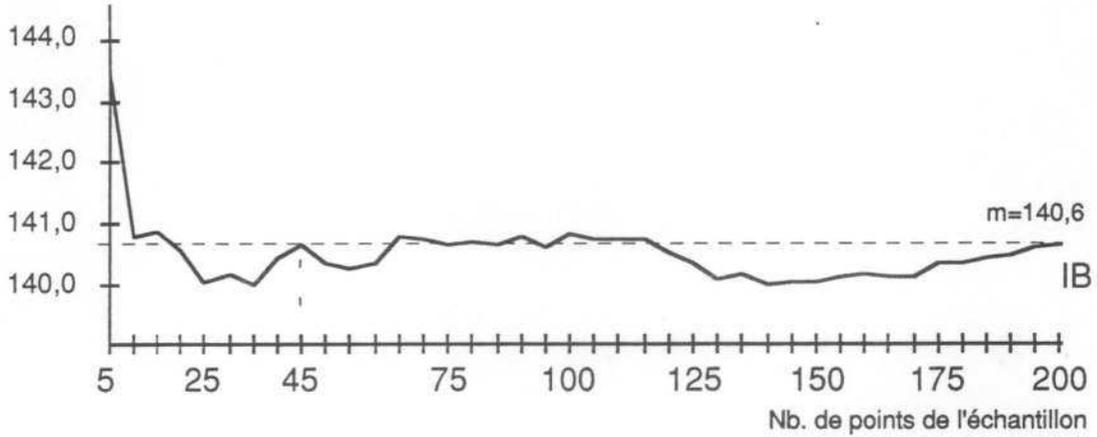
Parmi les exemples sélectionnés, seul celui de la palmeraie de Kouroudjel possède un caractère immédiat. En effet, il apparaît qu'aux alentours de 35 individus sélectionnés dans l'échantillon, la courbe des moyennes se stabilise. Elle coupe d'ailleurs la valeur de la moyenne des valeurs spectrales calculées pour un échantillon de 150 individus, matérialisée par un tireté. Il est donc possible de considérer que le résultat de l'inventaire est équivalent, en termes de précision, si l'on retient 35 unités d'enquête ou 150. Ce n'est pas le cas en temps de travail.

¹KERSHAW 1985 p.26

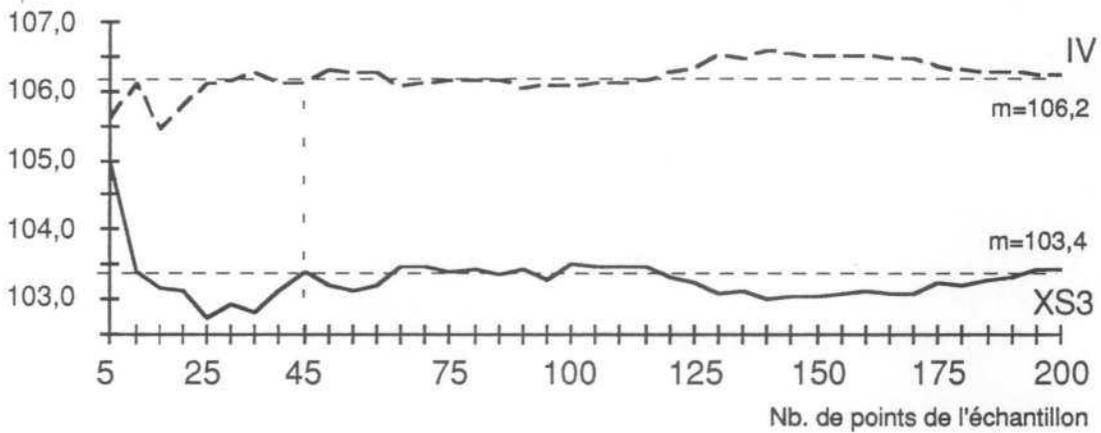
figure 6.1 - Effectif de l'échantillon par moyenne successive

Zone dunaire de Rosso

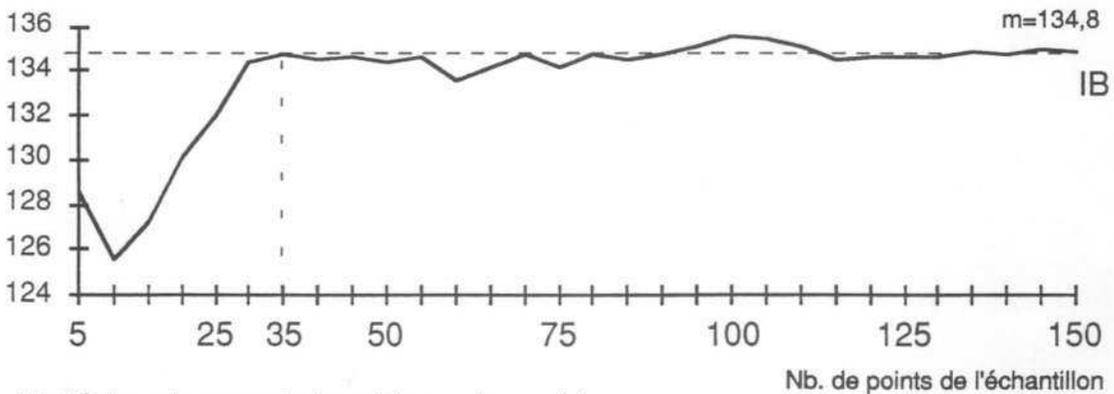
Valeurs spectrales des moyennes



Valeurs spectrales des moyennes

**Palmeraie de Kouroudjel**

Valeurs spectrales des moyennes



L'unité des valeurs spectrales est le compte numérique

- - - - $m=140,6$ moyenne sur le nombre maximal de points de l'échantillon

- - - plus petite taille possible de l'échantillon

En revanche pour la zone dunaire de Rosso, il est beaucoup plus difficile d'arrêter son choix. Si nous avons retenu le seuil de 45 individus, c'est parce qu'il s'agit de la première intersection commune entre les courbes des moyennes et la valeur de chaque moyenne au seuil de 200 individus dans l'échantillon. Même avec trois courbes, le résultat est beaucoup moins évident que pour Kouroudjel, le nombre d'individus à sélectionner est difficile à établir.

Il faut peut-être rechercher l'explication de ce phénomène d'une part dans l'absence de structures (apparentes) dans le paysage de Kouroudjel (cf. 7.2.) et d'autre part dans des valeurs spectrales plus monotones sur cette oasis en raison d'une date de prises de vue tardive (cf. Annexe 2).

Nous avons de toute façon pris ces deux exemples extrêmes pour montrer que dans certains cas, même en augmentant le nombre de points échantillon, la stabilité recherchée est longue à venir et ne permet pas forcément d'arrêter aisément son choix sur un nombre d'échantillons satisfaisant.

6.1.1.2. *Discussion*

Les résultats présentés sont intéressants par leur diversité. Cependant, cette diversité ne simplifie pas le choix du chercheur. De plus aucun de ces estimateurs ne prend en compte la taille de la zone d'enquête. Comme nous le verrons plus loin cet aspect a son importance dans la sélection d'une méthode d'inventaire.

L'estimateur utilisant le coefficient de variation est de loin la méthode qui préconise le moins de points d'enquête. Pour une erreur totale de 10 p.100 et plus, le nombre de points d'enquête est inférieur à neuf lorsqu'il est évalué sur les canaux bruts. Il faut un coefficient de variation de 20 p.100, obtenu sur une composition colorée, pour atteindre les 16 points d'enquête. L'utilisation du coefficient de variation, que ce soit sur les canaux bruts ou en combinaison, ne semble pas être adapté aux données satellitaires. Si l'on compare ses résultats à ceux des distributions bi ou multinomiales, basées sur le nombre de thèmes et leur taille, il propose un nombre de points d'enquête très inférieur et peu compatible avec une bonne représentativité de toutes les catégories d'occupation du sol.

L'étude des distributions bi ou multinomiales, par l'estimateur de "Tortora", fournit des résultats plus conforme à notre attente. Toutefois, pour des petites zones d'études, le nombre des unités d'enquête reste trop élevé pour le temps qu'il est possible de leur consacrer sur le terrain, surtout pour une erreur de 10 p.100. N'oublions pas que ce ne sont pas uniquement les points sélectionnés qui sont enquêtés, mais une surface développée à partir de chacun de ces points, le segment.

Les moyennes successives de la méthode "Kershaw" sont simples mais longues à mettre en place. De plus, comme toute méthode sur les canaux bruts, celle-ci est tributaire de la dynamique de l'image. En zone sahélienne sableuse, c'est le cas pour les deux secteurs présentés, une prise de vue de fin décembre (les oasis) a plus de risques de présenter un contraste radiométrique atténué qu'une image de début novembre (Rosso). Cette dernière comporte encore une proportion de végétation active assez importante (cf. 2.2. et 3.2.).

En raison de la taille réduite des zones d'étude (20 sur 20 km pour les secteurs agropastoraux et 2,5 sur 2,5 km pour les oasis, mais la problématique est différente) et au vu des résultats présentés, nous avons préféré retenir des méthodes plus pragmatiques qui tiennent compte de la taille des zones d'étude et du temps disponible pour l'enquête. Ceci n'exclut pas que pour des secteurs d'étude plus étendus, l'analyse des distributions bi ou multinomiales ne puisse venir en complément de la méthode que nous allons développer maintenant.

6.1.2. Taille de l'échantillon et contraintes de terrain

En l'absence d'une méthode de calcul théorique réellement simple et satisfaisante pour déterminer le nombre d'unités d'enquête, nous avons eu recours à une approche plus pragmatique dont l'objet principal est de tenir compte des contraintes du terrain.

6.1.2.1. Problèmes pratiques

La démarche retenue ne favorise plus prioritairement la recherche du nombre d'unités d'enquête, mais plutôt une bonne adéquation entre ce nombre et la taille des unités. Bien que théoriquement, il ne faille pas raisonner en terme de taux de sondage (cf. *supra*), cette démarche s'avère indispensable avec les sondages aréolaires, de nombreux auteurs la conseillent dans la mesure où l'on conserve un nombre d'unités d'enquête compatible avec les calculs d'estimation.

Il convient en premier lieu de se fixer le taux de sondage que l'on souhaite appliquer. Comme le signale Ph. Fournier¹, si la base de sondage est bien connue, il est possible de déterminer ce taux par un calcul de variance a priori. Cependant, il ajoute deux restrictions :

¹FOURNIER 1986 p.13

- «pour des enquêtes aréolaires, le calcul de la variance, c'est-à-dire la mesure de l'estimation de l'erreur aléatoire, pour la première année d'observation, ne peut s'effectuer qu'a posteriori, le tirage des unités d'observation est, en effet, indépendant d'une connaissance a priori de chacune de ces unités d'observation.» ;
- «par ailleurs, il n'est pas possible d'estimer a priori une variance, et par suite un coefficient de variation, à partir de la seule connaissance de la superficie globale d'une catégorie de territoire à l'intérieur d'un département [d'une zone d'étude] : on ne peut donc pas utiliser l'approximation $p*q/n$ où p est la proportion de la catégorie de territoire donnée, q son complément, n le nombre d'échantillons.»

Ces restrictions justifient le choix des formulaires retenus pour les calculs de variance, et donc ceux de précision (cf. 4.3.1.4. et 9.2.), ainsi que l'impossibilité d'utiliser l'approximation $p*q/n$ pour déterminer le nombre d'échantillons. Devant les difficultés du calcul a priori du taux de sondage, il conseille d'appliquer un taux standard de l'ordre de 1 à 2 p.100, car à l'issue de nombreux essais, il semble que celui-ci offre en général des résultats satisfaisants.

En dehors des travaux de Ph. Fournier, d'autres études, portant sur des milieux différents, retiennent des taux de sondage analogues. A titre d'exemple, le BDPA¹ relate des taux de 1,5 p.100 pour les inventaires régionaux de la CEE et de 1,7 p.100 pour l'enquête maïs du Kenya. Pour sa part, R.G. Congalton² a utilisé aux USA, sur trois types de paysage différents (agricole, pastoral et forestier), des taux de l'ordre de 1 p.100 avec satisfaction, etc. **Nous avons donc retenu pour notre propre enquête des taux de sondage compris entre 1 et 2 p.100.** Ces chiffres nous paraissaient applicables au milieu naturel tropical avec un faible risque d'erreur.

Le taux de sondage T_x dans les méthodes aréolaires est un compromis entre le nombre d'unités d'enquête m , la taille de ces unités N_i et la superficie S_{zp} de la zone d'étude.

$$T_x = \frac{m * N_i}{S_{zp}}$$

Cette équation a deux inconnues, m et N_i , car la superficie de la zone d'étude S_{zp} peut être déterminée aisément. Il s'agit en général d'une unité administrative ou

¹BDPA 1988 p.17

²CONGALTON 1988 p.598

d'une forme géométrique simple, image satellite par exemple, dont on connaît ou peut connaître la superficie.

De ces deux inconnues, plusieurs études indiquent que la superficie N_i du segment joue un rôle déterminant dans la réussite de l'inventaire, que ce soit lors de l'enquête ou bien lors des traitements. C'est donc en premier lieu sur celle-ci que nous avons porté notre attention.

Comme nous ne perdons pas de vue qu'un des buts de l'inventaire d'occupation du sol est de fournir pour chaque thème identifié l'estimation de sa superficie de la manière la plus précise qui soit, **nous devons chercher à réduire par tous les moyens la variance de nos estimations.** Or, comme le signalent C.R. Bryant et L.H. Russwurm¹ : *«lorsque les unités d'échantillonnage sont effectivement des grappes, la taille de l'unité influe sur la variabilité.»*. Rappelons que les méthodes aréolaires relèvent des tirages en grappes (cf. 4.3.1.2.).

Ils ajoutent de même que la réduction de la variance intervient de la façon suivante : *«lorsque les cases ou les grappes utilisées deviennent plus grandes que chaque groupe ou concentration d'utilisation des terres individuelle dans la configuration, la variance dans la population décroît jusqu'à un certain point.»*. **On recherchera donc des segments dont la taille est supérieure à celle du parcellaire moyen.**

Ils expliquent cette diminution de la variance par le fait que, pour une distribution spatiale des thèmes relativement homogène : *«la réduction de la variance, associée à l'augmentation de la taille des cases, est reliée au fait que chaque case ou grappe devient plus représentative de la population totale, ce qui est d'ailleurs sa fonction.»*. Ajoutons, qu'en l'absence d'homogénéité de la distribution des paysages au niveau de l'ensemble de la zone d'étude, il peut être intéressant de stratifier pour enquêter des paysages plus homogènes.

En conséquence, le segment doit avoir une taille nettement supérieure à celle de la parcelle. Il contient alors plusieurs parcelles de nature et de taille différentes. De ce fait, pour un milieu assez homogène, la proportion de chacun des thèmes est relativement proche d'un segment à l'autre. Si toutes ces conditions sont remplies, la variance des estimations sera dans l'ensemble modérée.

Nous venons de démontrer l'intérêt d'un segment d'assez grande taille renfermant plusieurs parcelles, il nous faut donc arrêter une taille optimale. Il existe au moins deux méthodes, qu'il est possible de combiner, pour déterminer cette taille

¹BRYANT 1983 p.19

optimale. La première est liée à la physionomie du paysage, la deuxième au coût de l'enquête de terrain.

La physionomie du paysage apparaît au chercheur sous la forme d'entités élémentaires qu'il est possible d'individualiser et de reconnaître, non seulement sur le terrain mais aussi sur l'imagerie satellitaire (cf. 6.3.2.). Ces entités sont les parcelles ou unités d'observation précédemment évoquées. Rappelons que la parcelle naturelle ou culturelle est la plus petite unité homogène du couvert végétal qu'il est possible d'identifier, sur le terrain et sur l'imagerie satellitaire dans notre cas.

Les équipes qui ont travaillé sur le sujet ont démontré que l'on obtenait de très bons résultats en adaptant la taille du segment à la physionomie du paysage.

En effet, Ph. Fournier¹ indique qu'en milieu agricole la taille du segment doit se moduler d'une part sur la taille du parcellaire mais aussi, d'autre part, sur la taille moyenne d'une exploitation agricole, cela pour avoir une bonne probabilité de couvrir tous les types de spéculations végétales. Ces deux concepts sont apparus comme fondamentaux dans notre démarche, bien que celle-ci ait lieu en milieu naturel sahélien. Il nous faut donc les adapter à notre contexte si l'on souhaite les utiliser pour affiner la détermination de la taille du segment (cf. 6.1.2.2. et 7.2.).

En pratique, plus le parcellaire est petit, plus le segment l'est aussi, et inversement. En Ardèche, M. Touzelet² *et alii* ont enquêté deux tailles de segments : 25 ha dans les zones de petits parcellaires ; 50 ha dans les autres cas. En Eure-et-Loir, R. Pastorelli³ a pris un moyen terme avec des segments de 36 ha. Pour le parcellaire nord-américain, C.R. Bryant et L.H. Russwurm⁴ rapportent que l'échantillon aréolaire utilisé par *Statistique Canada* est d'environ 770 ha (!), etc.

Il est donc possible de faire prendre à l'unité d'enquête des tailles très variées en fonction de la physionomie du paysage. Or, lors de l'enquête réalisée pour le compte des autorités mauritaniennes⁵, nous n'avons aucune étude en milieu naturel tropical qui puisse nous servir de référence pour déterminer la taille de l'unité d'enquête. De plus, le temps dont nous disposions était trop court pour que nous puissions mener à terme les recherches entreprises sur la détermination de la taille des parcelles naturelles. Il ne restait, de ce fait, pour sélectionner une taille de segment opérationnelle que peu d'éléments. La solution est venue pour partie de l'analyse des coûts d'enquête de terrain.

¹FOURNIER 1986 p.14

²TOUZELET 1983 p.11

³PASTORELLI 1986 p.8

⁴BRYANT 1983 p.38

⁵DE WISPELAERE 1989

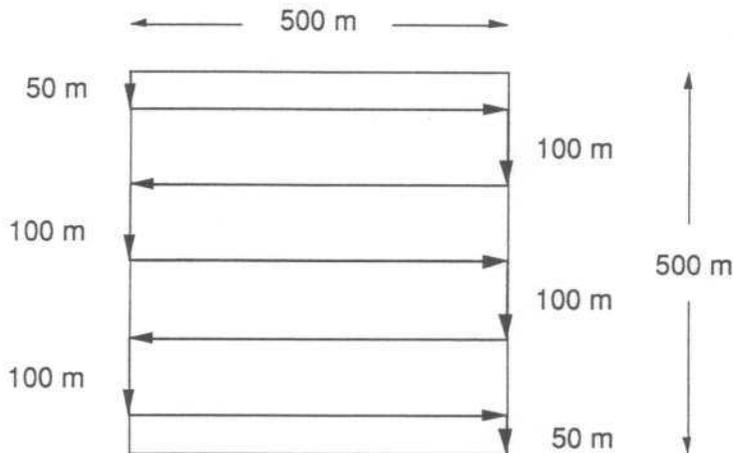
Le compromis entre le nombre de segments et leur taille est aussi fonction du coût d'observation. Ce coût peut se décomposer en deux parties, le **coût de liaison** pour atteindre le segment, puis le **coût d'enquête** proprement dit. Pour rentabiliser le coût d'observation, on a tout intérêt à accroître le temps d'enquête par rapport au temps de liaison, c'est d'ailleurs une justification supplémentaire de l'utilisation des tirages en grappe.

D'un point de vue temps d'enquête, des essais ont démontré que le temps d'enquête optimal, toujours en milieu agricole tempéré, était d'une demi-journée par segment, temps de liaison compris¹. Partant de ce constat, nous avons estimé qu'il était possible d'enquêter un minimum de deux segments par jour, bien que les essais précédemment cités soulignent un moins bon rendement lorsque l'opérateur est mobilisé huit heures d'affilée. Nous avons misé sur la motivation de l'opérateur.

figure 6.2 - Cheminement théorique à l'intérieur du segment

Cas d'un segment carré de 500 m de côté

Pour une équidistance de 100 m entre transects



On peut être tenté, pour rentabiliser au maximum le temps d'enquête sur le terrain, d'accroître exagérément la taille du segment, et donc d'en réduire le nombre. C'est un mauvais calcul. D'une part, il ne faut pas trop réduire le nombre de segments pour assurer une certaine représentativité de l'ensemble de la zone d'étude d'autre part, le cheminement sur le segment se fait la plupart du temps à pied (par des températures supérieures à 30° C en fin de saison des pluies), il est donc source de fatigue. Dès lors, l'opérateur ne "récupère" que pendant les parcours de liaison en voiture. Si les périodes de repos se réduisent trop par rapport à celles d'activité,

¹FOURNIER 1985b p.11

l'augmentation des erreurs d'observation sur les "fins de segment" risque d'être sensible. Nous en avons été témoin sur nos propres inventaires.

Comparons à titre d'exemple le cheminement théorique réalisé à pied sur un segment de 100 ha, soit 1 000 m de côté, et sur un segment de 25 ha, soit 500 m de côté. La forme carrée du segment a été décrite comme optimale (cf. 4.2.2.1.), nous n'y reviendrons pas. Pour simplifier la comparaison, ce cheminement sera composé de transects systématiques espacés de 100 m chacun (cf. fig. 6.2).

Dans le premier cas, le chercheur-opérateur parcourt au moins 11 km par segment. C'est-à-dire, 10 transects de 1 000 m, plus les liaisons d'un transect à l'autre, soit l'équivalent d'un côté du segment, 1 000 m. Dans le second cas, seuls 5 transects de 500 m (2,5 km), plus 500 m de liaison, soit 3 km, seront nécessaires pour avoir une vision analogue du segment. Il faudra quatre fois plus de segments pour observer la même superficie de terrain, si l'on ne met en parallèle que le cheminement sur transect, respectivement 10 et 2,5 km. Le coût d'observation sera plus élevé, mais la qualité des observations sera sans doute meilleure, car en théorie plus diversifiée et avec des périodes de récupération quatre fois plus fréquentes. Elles devraient permettre de réduire les erreurs d'observation liées à la fatigue. Nous excluons donc a priori d'avoir recours à des segments d'une taille égale ou supérieure à 1 000 m.

Enfin, il reste deux aspects à envisager avant de définir la taille du segment d'enquête : sa compatibilité avec la résolution d'un ou plusieurs capteurs satellitaires différents et, dans notre cas, le nombre minimum de segments souhaités.

Dans le cas de SPOT, avec une résolution de 20 m en mode multispectral, il est théoriquement possible de déterminer la longueur d'un des côtés du segment avec une précision de 20 m. Il est de ce fait admis que l'on peut localiser sur l'imagerie satellitaire un objet de trois pixels de côté, soit 60 m * 60 m, sauf contraste radiométrique particulier. C'est en quelque sorte la parcelle radiométrique minimale.

Cependant, la localisation sur le terrain est loin d'être toujours aussi précise. Parfois, l'absence de points remarquables, pour recaler sa position, ne permet plus d'observer que des sites homogènes de plusieurs centaines de mètres de côté (cf. 6.3.2.). Pour des raisons de commodité, et comme il est souvent illusoire de se localiser avec une précision inférieure à la centaine de mètres, nous avons retenu comme référence un multiple de 100 pour déterminer le côté du segment carré. Cette unité de base s'est révélée à l'usage satisfaisante d'un point de vue théorique et pratique.

Dans le cas d'une utilisation ultérieure de SPOT en résolution panchromatique, 10 m, une base 100 ne pose pas de problème particulier. En revanche dans le cas de Landsat MSS et TM, la situation est un peu plus compliquée.

Dès lors que l'on s'est fixé que le côté du segment doit être un multiple de 100 m et qu'il doit être inférieur à 1 000 m, l'unique compatibilité de tailles d'enquête entre SPOT (20 m de résolution) et MSS (80 m) correspond à un segment de 800 m de côté, soit 64 ha. Cette taille de segment s'est avérée trop élevée (cf.7.2.1.2.), et de plus, le capteur MSS n'a pas été retenu en raison du manque de finesse de sa résolution et des problèmes que cela nous a posés à l'issue des traitements de la mission de 1985¹.

Le capteur TM, en revanche, offre plus de latitude avec sa résolution de 30 m. Soit, pour moins de 1 000 m de côté et tout en étant un multiple de 100, les trois longueurs suivantes : 300, 600 et 900 m.

Comme nous souhaitions le cas échéant pouvoir utiliser, voire comparer, les données SPOT et TM, **nous avons retenu un segment de 600 m de côté, soit 36 ha**. Le cheminement théorique est alors d'environ 3,5 km.

Pour tester cette méthode, il était préférable de ne pas retenir, pour une première expérience sur le milieu naturel sahélien, une zone d'étude trop vaste. Nous ne l'avons donc pas directement testée sur l'ensemble d'une association pastorale, soit en moyenne 300 000 ha, mais sur un beaucoup plus petit secteur d'étude. Les deux zones retenues pour tester cette procédure d'inventaire font environ 40 000 ha chacune. En réalité, nous avons conservé le format des fichiers informatiques de départ, c'est-à-dire des fichiers images de 1 024 pixels de côté, 20 480 m pour un pixel SPOT de 20 m, soit environ 41 900 ha.

Bien qu'en règle générale, il ne soit pas nécessaire de se fixer un nombre minimal d'unités d'enquête, c'est en revanche indispensable sur d'aussi petits secteurs et avec des segments de 36 ha. En phase opérationnelle, que se soit sur des associations pastorales ou sur des entités administratives, le nombre des segments dépasse toujours le seuil des 30 unités d'enquête dans l'échantillon, seuil au-delà duquel il est admis que la loi des grands nombres s'applique.

Dans notre cas, si l'on avait retenu 30 segments de 36 ha chacun pour des zones d'étude d'environ 41 900 ha, le taux de sondage aurait été de 2,6 p.100. Pour plusieurs raisons, nous avons préféré rester dans des valeurs de taux de sondage comprises entre 1 et 2 p.100.

Pour des questions d'emploi du temps, nous souhaitions enquêter chaque secteur en 10 jours maximum. A raison de deux segments par jour, il n'était pas possible d'en voir plus de 20 par secteur. Ensuite, d'un point de vue pratique, il n'est pas aisé de faire tenir sur une petite superficie un tel nombre de segments dont le

¹DE WISPELAERE 1987 p.20

positionnement dépend d'un tirage aléatoire. Il est très rare, surtout si le nombre des segments est élevé, que l'on obtienne lors du premier tirage la totalité des unités d'enquête souhaitées, en général, une partie d'entre elles "tombe" en dehors de la base de sondage. Dans ce cas-là, il faut refaire un ou plusieurs tirages (cf. 6.2.). On a de toute façon intérêt à réaliser plusieurs tirages pour sélectionner le plus performant (cf. 7.1.).

Nous avons donc préféré réduire quelque peu la représentativité de notre sondage en ne tirant que 20 unités d'enquête. Cela permettait de s'assurer d'une part que l'échantillon serait rapidement constitué et que d'autre part les unités échantillonnées seraient toutes enquêtées. Dans cette configuration (20 segments de 36 ha chacun pour une zone d'étude de 41 900 ha), le taux de sondage retenu est de 1,7 p.100.

Ce taux reste assez élevé, mais il est délicat de réduire encore plus le nombre des unités d'enquête, car les zones tests retenues sont très hétérogènes. Pour obtenir des résultats satisfaisants d'un point de vue précision des estimations, il est indispensable de conserver un nombre de segments élevé pour que la variance des estimations de superficies, calculées sur ces segments, ne soit pas trop forte (cf. 9.).

En phase opérationnelle sur des secteurs de grande taille, voire sur des grandes strates, le nombre des unités d'enquête est élevé bien que le taux de sondage soit faible, il en découle pour la majorité des thèmes une variance très faible. Pour un taux de sondage de 1 p.100, le nombre de segments observés sur un département comme la Seine-et-Marne (environ 600 000 ha) est de 112¹.

En conclusion, pour réduire la variance des estimations de superficies, il faut retenir des segments d'assez grande taille, mais ceux-ci doivent tout de même rester suffisamment nombreux pour saisir la diversité des paysages. Il faut donc trouver un compromis entre le coût et la représentativité de l'enquête. En l'absence d'information sur la physionomie du paysage lors de l'application de cette méthode dans le Sahel mauritanien², nous avons retenu des segments de 600 m de côté, soit 36 ha. Leur intérêt principal est d'être compatible avec la résolution de SPOT et TM et de ne pas contraindre l'opérateur à des parcours pédestres trop importants qui sont facteurs de fatigue et donc d'erreurs d'observation.

Bien qu'il n'ait pas été possible, avant la mission de terrain, de vérifier si la taille des segments était supérieure à celle du parcellaire naturel, nous pensons

¹FOURNIER 1986 p.29

²DE WISPELAERE 1989

toutefois que cette recherche est intéressante à mener pour affiner la détermination de la taille du segment. C'est cet aspect qui va être évoqué maintenant.

6.1.2.2. Recherche sur les parcelles naturelles

L'étude du "parcellaire" à l'aide de l'imagerie satellitaire passe par l'analyse structurale des unités d'observation. Cela consiste à trouver la "frontière" entre deux unités et à quantifier la taille de ces unités. Cette recherche peut se pratiquer sur du parcellaire marqué, comme les cultures, ou sur du parcellaire non marqué, comme la végétation naturelle. Dans la littérature, il est souvent dit que pour mettre en évidence les premières, on utilise des méthodes comme les écarts-types locaux ou des filtrages comme les filtres de convolution, les Sobel, etc. Les zones homogènes des secondes sont mises en évidence par les moyennes locales, les opérateurs de morphologie mathématique sur les niveaux de gris, etc. Nous décrirons plus loin celles retenues.

Cependant, comme cela a déjà été signalé, les missions de terrain de l'enquête support¹ se sont déroulées avant que les recherches concernant l'adaptation de la taille du segment à la physionomie du paysage n'aient abouti. De ce fait, la taille et le nombre des segments utilisés sur le terrain ont été déterminés de manière très pragmatique, comme indiqué au point précédent. Il nous a toutefois semblé utile, même si nous n'avons pas pu les mettre en pratique, de proposer et de tester quelques méthodes d'analyse du parcellaire.

Quelle que soit l'optique avec laquelle on aborde la mise en relation de la taille de l'unité d'enquête et de la physionomie du paysage, il ne faut pas perdre de vue que ce sont de toute façon les contraintes extérieures (temps disponible, superficie à couvrir, etc.) qui priment. En effet, même si cette phase de recherche démontre que les résultats, en termes de précision, sont meilleurs, non pas avec 20 segments de 36 ha, mais avec 36 segments de 20 ha, il faut s'en tenir à ce qui est réalisable. Il sera toujours plus facile d'exploiter et de valoriser une enquête un peu grossière mais complète, qu'un inventaire très pointu mais comportant un certain nombre de non-réponses, en raison des segments qui n'ont pas matériellement pu être enquêtés.

En reprenant ce qui a été énoncé auparavant et dans la mesure où il est possible de rechercher l'adéquation optimale entre la taille du segment et la physionomie du paysage, **il faut définir des segments dont la taille est suffisamment importante pour qu'ils contiennent plusieurs parcelles, sinon c'est un sondage par points ou par placettes, et que celle-ci leur permette de contenir des groupes de parcelles dont la**

¹DE WISPELAERE 1989

diversité, le nombre et la taille seront proches du "paysage type". Dans la mesure où ces deux conditions pourront être remplies, la variabilité entre les segments sera faible et pratiquement toutes les catégories d'occupation du sol seront représentées.

Nous avons défini dans la mise au point terminologique le parcellaire naturel comme étant l'association des différentes composantes du paysage. Ce parcellaire est accessible au moyen des valeurs spectrales, qu'elles soient brutes ou traitées. Comme il s'agit de définir la taille des unités d'enquête avant d'aller sur le terrain, nous allons utiliser la vision "radiométrique" que l'on a du paysage pour affiner cette détermination.

Si l'on admet que la présence d'un thème en un endroit n'est pas totalement indépendante de sa présence dans un proche voisinage, on comprend que le segment soit une aire assez homogène et qu'il faut beaucoup accroître sa taille, plusieurs pixels, pour passer d'une moyenne de n thèmes par segment à une moyenne de $n+1$ thèmes. Pour décrire ce phénomène, on parle d'**autocorrélation spatiale**, nous y reviendrons plus loin (cf. *infra*).

Le but de cette recherche est de définir, en fonction des valeurs spectrales et de ce que l'on connaît du paysage, la taille du segment qui va permettre avec un minimum d'unités d'enquête la description la plus complète de la zone d'étude.

Pratiquement, pour un paysage très homogène, on va rechercher la taille qui permet à chacun des segments de contenir la presque totalité des thèmes. En cela, on se rapproche de la recommandation de Ph. Fournier¹ qui conseille d'utiliser des segments qui ont «... *une bonne probabilité de couvrir tous les types de spéculations végétales ...*». En milieu agricole tempéré, cette recommandation implique que la taille du segment soit choisie comme étant la plus proche de la taille de l'exploitation agricole "moyenne". Dans un milieu naturel relativement hétérogène, il faudra peut-être se contenter d'une taille de segment qui permette de visiter dans chacun d'eux 50 p.100 des thèmes de la zone d'étude, voire seulement 30 p.100. Pour le savoir, il nous faut déterminer et tester les outils utiles à cette évaluation de la taille optimale du segment.

Nous avons d'abord pensé rechercher la fréquence d'apparition d'un thème supplémentaire quelconque pour différentes tailles de segments. Pour cela, une cartographie automatique de la zone d'étude est réalisée (cf. 4.3.2.1. et 7.1.).

Sur celle-ci, un certain nombre de points sont tirés aléatoirement. A partir de ces points, différentes tailles de segments doivent être développées par incrémentation successive. Pour chaque nouvelle taille, la fréquence moyenne

¹FOURNIER 1986 p.14

d'apparition d'une nouvelle entité thématique est calculée. En connaissant le nombre total de thèmes déterminé par la classification automatique, il est possible pour chaque distance calculée de connaître le nombre probable de thèmes par nouvelle taille de segments. Il ne reste plus alors qu'à chercher l'adéquation la plus favorable entre la physionomie du paysage et les impératifs de l'enquête.

Cependant, dans cette approche, la taille des entités thématiques n'intervient pas, seule la fréquence d'apparition est envisagée. Ceci comporte quelques inconvénients. La taille du parcellaire n'est pas prise en compte, donc les effets de bordures et autres pixels isolés sont comptabilisés comme les entités dont la surface est suffisante pour porter un site d'observation. Il nous a donc paru utile de rechercher une méthode qui prenne en compte la taille du parcellaire pour éliminer les entités trop petites.

Pour cela, il faut effectuer une recherche sur la taille du parcellaire à l'aide de descripteurs issus des techniques de la **géostatistique** ou de la **morphologie mathématique**. Ces techniques considèrent l'image non plus comme une collection de pixels indépendants mais comme un ensemble de formes jointives. Nous les avons testées sur les résultats des cartographies automatiques binarisées (cf. 7.2.), joignant ainsi les méthodes issues de la théorie du signal (traitement sur les valeurs spectrales) et celles issues de la morphologie mathématique (traitement sur les formes).

Sans entrer dans les détails, ils seront analysés plus loin (cf. 7.2.), le principe de la méthode est de rechercher les limites de chaque entité thématique, de mesurer sa superficie et de rejeter les entités qui sont trop petites pour être enquêtées (cf. 6.2.2.). Il est ensuite possible de calculer la surface moyenne du parcellaire naturel et donc le nombre de ces parcelles pour une taille de segment donnée. On saura donc, en fonction de la taille de l'unité d'enquête retenue, combien de parcelles thématiques il faudra en moyenne inventorier et donc combien de temps il faudra consacrer à chaque segment.

En effet, comme le note déjà Ph. Fournier¹ pour les enquêtes agricoles en Ile de France, alors qu'il n'y est pas question de faire des mesures quantitatives mais seulement des observations qualitatives, «... *quelques minutes suffisent pour un segment constitué d'un nombre limité de grandes parcelles disposées de part et d'autre d'une route traversant le segment dans sa diagonale, plusieurs heures peuvent être nécessaires lorsqu'il existe 40 à 50 parcelles.*».

Nous voyons tout de suite que si la taille optimale du segment contient même seulement 20 parcelles, dans le cadre d'un inventaire pastoral, il ne sera pas possible

¹FOURNIER 1986 p.24

pour des questions matérielles d'effectuer les mesures quantitatives sur l'ensemble de celles-ci. Seule la biomasse de certaines d'entre elles pourra être quantifiée, d'où l'intérêt d'un sondage à deux degrés (cf. 6.3.3.).

Enfin, comme les techniques de morphologie mathématique décrites précédemment ne prennent pas en compte le contenu des parcelles mais seulement leurs limites, elles ne permettent pas de savoir s'il y a une organisation spatiale du paysage. Ce point a son importance, car s'il existe une structure régulière, elle doit être prise en considération par le sondage.

Comme le notent B.J.L. Berry et A.M. Baker¹, si les paysages se répartissent au hasard, toutes les techniques de sondages aléatoires seront sans biais. En revanche, s'il existe une tendance linéaire et que celle-ci est mal connue, le plus sûr est de recourir à un sondage systématique non aligné, ce que nous avons fait (cf. 4.2.2.2.). Dans le cas d'un échantillonnage dans un système dunaire, ce type de tirage a la probabilité la plus forte de représenter toutes les composantes du paysage, alors qu'un simple tirage systématique risque, s'il est en phase avec les ondulations, de ne révéler qu'une de ses composantes. Pour expliquer cette tendance linéaire on évoque les phénomènes d'autocorrélation spatiale.

Qu'est-ce que l'autocorrélation spatiale ? Une donnée est dite spatialement autocorrélée lorsque, pour la variable qui la décrit, la probabilité de présence en un lieu est liée à sa présence ou à son absence dans les zones voisines. Cette notion est facile à comprendre dans un champ de dune (cf. 7.2.). Les données satellitaires sont particulièrement sensibles à ce phénomène dû à la relation qui unit la longueur d'onde, la résolution du capteur et la physionomie du paysage.

La plupart des algorithmes de classification sont basés sur la notion d'indépendance statistique. Or, la dépendance géographique peut perturber, voire annuler, l'indépendance statistique. En l'absence de mesures infirmant la présence de dépendance spatiale, lors de l'initialisation ou du contrôle des traitements, J.B. Campbell² conseille l'utilisation de pixels non contigus et dotés d'un espacement tel, qu'entre les éléments de l'échantillon, il n'y ait pas de risque de dépendance. Cette remarque n'est pas contraire à la nécessité de groupes de pixels homogènes et contigus pour la localisation sûr le terrain. La surface des segments et leur nombre doivent permettre, si nécessaire, de tirer au hasard les points servant à l'initialisation des traitements (cf. 8.1.1).

Il est de toute façon utile de contrôler le niveau d'autocorrélation des données avant de se décider sur une taille d'unité d'enquête. R.G. Craig³ démontre, sur des

¹BERRY 1968 p.94

²CAMPBELL 1981 p.355

³CRAIG 1979 p.1520

données Landsat MSS (nord-Ohio USA), que la dépendance inter-pixels ne se fait plus sentir après le 10^e pixel. M.L. De Keersmaecker¹ compare les coefficients de corrélation calculés sur les valeurs de luminance des données Landsat TM et SPOT XS. Au vu de ces résultats, il semble que la dépendance reste plus forte et plus durable avec SPOT qu'avec TM. Est-ce dû à une meilleure prise en compte de la complexité spatiale liée à l'augmentation de la résolution entre TM et SPOT, ou à une différence de perception du spectre radiométrique ? On aura de toutes façons intérêt à évaluer cette dépendance spatiale des données pour chaque nouveau paysage, ou pour un même paysage si l'on change de capteur.

Nous avons essayé d'évaluer sur nos différentes zones d'études le degré de dépendance des pixels avec leur voisinage. Pour cela, nous n'avons pas eu recours aux corrélogrammes mais à une autre technique de géostatistique, l'**analyse variographique**. Ces deux approches ne sont pas très différentes. La méthode et les résultats seront développés à la section 7.2.

L'analyse variographique doit donc permettre de déceler la présence de structures régulières dans le paysage. Plusieurs niveaux de régularité peuvent être mis en évidence par cette analyse. En dehors du fait qu'il faut se prémunir de la dépendance spatiale pour utiliser la plupart des algorithmes de traitement, certains niveaux de régularité peuvent nous intéresser dans la détermination de la taille optimale du segment. Cette analyse, contrairement aux deux précédentes, n'est pas effectuée sur le résultat des cartographies automatiques, mais sur les radiométries brutes. Cette technique permet en outre de se dégager des problèmes liés à la détermination de la taille des fenêtres mobiles utilisées lors des analyses locales du type moyenne ou écart-type local.

Si nous considérons que le paysage se décompose en trois niveaux de relations : le premier niveau est **textural**, il concerne la distribution des pixels entre eux. Ce que l'on en perçoit, les variations locales de niveau de gris par exemple, s'effectuent sur de petites distances, quelques pixels (ordre de la dizaine à la centaine de mètres). Le second niveau est **micro-structural**, il concerne l'organisation des textures ou des éléments texturaux, les parcelles thématiques. Les variations micro-structurales se réalisent sur des distances plus importantes, quelques dizaines de pixels (ordre de la centaine de mètres), voire plus exceptionnellement quelques centaines de pixels. Enfin le dernier niveau, que nous appellerons **macro-structural**, à l'échelle d'un fichier satellitaire, prend en considération les variations dépassant la centaine de pixels, voire le millier de pixels (ordre du kilomètre).

¹DE KEERSMAECKER 1987 p.199

Dans la mesure où il a été démontré que le segment le plus efficace était celui dans lequel on avait la plus grande probabilité de couvrir tous les types de paysages (cf. *supra*), il convient en cas de régularité dans la structure d'en trouver sa période. En effet, un segment dont la taille serait équivalente à la période du phénomène répétitif aurait une forte probabilité de contenir toutes les combinaisons thématiques et donc d'être plus représentatif de la population totale qu'un segment qui n'en tiendrait pas compte.

Parmi les niveaux décrits, celui qui concerne les micro-structures est le plus apte à remplir ce rôle. Il est le seul à pouvoir prendre en compte un phénomène régulier qui regrouperait plusieurs parcelles contiguës tout en conservant une taille compatible avec les impératifs d'enquête décrits précédemment. Le niveau textural est en général infra-parcellaire, tandis que le niveau macro-structural induirait une taille de segment trop importante, plusieurs kilomètres de côté.

En conclusion, que l'on retienne une ou plusieurs des méthodes proposées pour affiner la taille du segment en fonction du paysage, les impératifs décrits au point précédent priment. Souvent, dans le cas d'une étude appliquée, **ce n'est qu'autour des valeurs dictées par les contraintes de temps et de coûts d'enquêtes que l'on peut moduler la taille du segment sur la physionomie du paysage.** Il est donc possible d'ignorer cet aspect comme nous avons été contraint de le faire lors de l'enquête support¹. Toutefois, comme nous le verrons à la section 7.2. il mérite, lorsque cela est possible, que l'on s'y attarde.

Quelle que soit la méthode utilisée, on se rend compte que si le milieu est hétérogène globalement, il est en général homogène à un niveau local, c'est-à-dire strate par strate. Dans la mesure où les strates sont différentes l'une de l'autre, c'est leur raison d'être, on est amené à se poser les questions suivantes :

- doit-on utiliser des taux de sondage différents d'une strate à l'autre ?

et si oui,

- doit-on faire varier le nombre d'unités d'enquête, voire la taille de ces unités ?

Répondre à ces questions, c'est s'interroger sur le dernier point non encore évoqué dans la phase de mise en place du sondage, la répartition des unités d'enquête.

¹DE WISPELAERE 1989

6.1.3. Répartition des segments

La répartition des segments sur l'ensemble de la zone d'étude a déjà fait l'objet de notre intérêt lorsque nous avons évoqué les possibilités de stratification (cf. 4.2.1. et 4.3.1.1.). Sans revenir sur cet aspect, il faut néanmoins en rappeler certaines caractéristiques avant de décrire la répartition des segments.

Bien que l'enquête support de cette étude n'ait pas bénéficié d'une stratification morphologique, la répartition de ses unités d'enquête est optimisée par la stratification géométrique implicite du tirage systématique, elle couvre l'intégralité de la zone d'étude. Toutefois, si l'on souhaite recourir à une stratification morphologique (cf. *infra*), dans la mesure où les unités d'enquête ont la même taille, le plus simple est d'effectuer un tirage équiprobable et proportionnel à la superficie des strates (cf. 4.3.1.). La procédure est sensiblement identique au tirage élémentaire pratiqué.

Dans notre cas, seuls deux aspects nous semblent suffisamment importants pour justifier l'utilisation d'une stratification morphologique. Le premier est lié à la valeur pastorale supposée de certaines parties de la zone d'étude, le deuxième au problème des "non-réponses".

La valeur pastorale renvoie à la notion de coût d'enquête. En effet, pourquoi inventorier de la même façon des glacis manifestement stériles sur les images satellites et des ondulations dunaires où l'activité végétale semble importante ? Dans la mesure où la zone d'étude renferme ce type d'opposition par rapport au thème de la recherche, il peut être opportun de stratifier pour concentrer l'enquête sur les zones de plus grand intérêt. Seulement, il ne faut pas perdre de vue que le tirage avec des taux inégaux d'une strate à l'autre va compliquer le dépouillement et les calculs. Le gain de temps sur le terrain doit être manifeste dès le départ.

Le problème des non-réponses paraît être une meilleure justification en milieu naturel tropical, car il n'est pas rare qu'un secteur soit inaccessible dans la zone d'étude et compromette toute l'enquête, en raison des segments que l'on ne pourra atteindre. Or la stratification permet de circonscire le risque à des secteurs particuliers. En cas de non-réponses sur un ou plusieurs segments, ce n'est pas toute la zone d'étude qui est affectée mais seulement la strate considérée.

De plus, une strate est rarement d'un seul tenant, elle est souvent dispersée en plusieurs zones. Si l'on a pris soin de définir les strates par classifications automatiques, il y a une très forte probabilité pour que la zone non enquêtée soit très proche radiométriquement des autres zones qui constituent avec elle la strate. Or pour les autres zones, on aura collecté des données de terrain. **De ce fait, moyennant une hypothèse de proximité thématique fondée sur la proximité radiométrique, il est possible de ne pas tenir compte des non-**

réponses et d'estimer pour l'ensemble de la strate concernée la superficie de chacun des thèmes. On considère que l'approximation ainsi réalisée reste tout à fait acceptable pour la précision de l'inventaire.

En clair, le taux de sondage sur cette strate sera d'autant plus faible que le nombre de segments non enquêtés sera élevé. Au niveau des résultats, la précision des estimations sera moins bonne sur cette strate que sur les autres, et bien évidemment cette légère baisse de précision se retrouvera à un niveau global pour tous les thèmes présents dans la strate incriminée.

Dans un milieu où l'accès à l'ensemble de la zone d'étude peut être compromis par une simple zone hydromorphe incontournable, en termes de coût d'enquête essentiellement, une stratification morphologique dont le tirage initial est proportionnel à la superficie des strates peut s'avérer être une assurance efficace contre les impondérables de tous genres. La mise en place du tirage n'est pas différente de celle d'un tirage systématique non aligné (cf. 6.2.). De plus, cette stratification n'est utilisée qu'en cas de non-réponse car le principe retenu est qu'elle n'est pas là pour améliorer la précision des estimations mais pour parer à des problèmes d'enquête. Le mode de calcul restera donc la plupart du temps celui présenté en section 4.3. et mis en pratique au chapitre 9. Lors d'un recours à la stratification rendu nécessaire par des non-réponses, on utilisera le formulaire adapté à la stratification.

Nous verrons plus loin que, même dans le cas d'un tirage à probabilité inégale, lorsque l'on souhaite des taux de sondage différents d'une strate à l'autre, il est souvent possible de réutiliser la grille de sondage initialement développée pour un tirage à probabilité égale, seule la phase finale de la procédure de tirage est modifiée

Une fois le nombre des unités d'observation évalué, il est donc possible de déterminer le pas de la grille, encore appelé maillage ou carroyage, qui va assurer à l'échantillon une répartition homogène sur l'ensemble du territoire. Le pas de cette grille peut être calculé par la formule proposée par G.H. Rosenfield¹ :

$$C = \sqrt{\frac{(X_{\max} - X_{\min}) * (Y_{\max} - Y_{\min})}{m}}$$

où C est le côté de cette maille, X et Y les côtés de la zone d'étude et m le nombre d'unités d'enquête précédemment déterminées. Dans un souci de simplification il est préférable d'inscrire la zone d'étude dans un carré ou un rectangle, une image satellite numérique ou analogique par exemple, quitte à n'en sonder que la partie utile.

¹ROSENFELD 1982 p.797

Un ajustement du pas de la grille peu s'avérer nécessaire si, une fois celle-ci positionnée aléatoirement sur la zone d'étude, il s'avère qu'un nombre d'unités d'observation trop important tombe hors de la zone d'étude. Cependant la marge de manœuvre est réduite si l'on ne veut pas trop modifier le taux de sondage d'une part et le nombre d'unités d'enquête d'autre part.

Dans le cas d'une zone d'étude inscrite dans un carré de 1 024 pixels de côté, donc 20,5 km avec un pixel SPOT de 20 m de résolution, la maille de côté C vaut approximativement 230 pixels, soit 4 600 m.

$$C = \sqrt{\frac{1024 * 1024}{20}} = 228,9$$

La surface de la maille est de 230 pixels au carré, soit 52 900 pixels (2 116 ha). Le segment dont on a fixé la surface à 36 ha, soit 900 pixels, représente environ 1,7 p.100. Il est donc tout à fait possible de réaliser directement, grâce à cette formule, la mise en place du tirage. Une fois le pas de la grille déterminé, il ne reste plus qu'à tirer aléatoirement les coordonnées lignes et colonnes permettant de rompre l'alignement du tirage systématique (cf. 4.2.2.2.), puis de développer le tracé des segments à partir de ces points.

Cependant, dans un souci de rigueur, il nous faut préciser que la méthode de tirage initialement retenue s'est largement inspirée de celle pratiquée par le SCEES¹. Bien qu'il existe peu de différence entre la méthode précédemment décrite et celle du SCEES, nous allons développer celle qui a réellement été pratiquée dans notre enquête (cf. 6.2.).

En conclusion, et alors qu'il est fréquent d'entendre dire qu'il vaut mieux un nombre important de points d'enquête de petite taille plutôt qu'un nombre restreint et de grande taille, nous avons démontré qu'il fallait tempérer cette affirmation. En effet, dans le cas des enquêtes aréolaires, on obtient de meilleurs résultats lorsque l'unité d'enquête, le segment, regroupe un certain nombre de parcelles. Pour cela, sa superficie doit être assez importante. La variabilité y sera assez élevée mais semblable d'une unité à l'autre. De plus, elle lui confère une physionomie globale proche de celle de la zone d'étude, toutes choses appréciables dans le cas des méthodes aréolaires. Enfin, avec un nombre de segments assez restreint, les coûts d'enquête seront relativement légers.

En revanche, les estimateurs statistiques "classiques" pour déterminer le nombre d'unités d'enquête se sont avérés peu adaptés. En cas d'utilisation, ils

¹FOURNIER 1986 p.16

contraignent parfois l'opérateur à échantillonner un nombre d'unités plus important qu'il ne peut en inventorier.

C'est donc par une approche plus pragmatique, qui tient avant tout compte des contraintes liées à l'enquête et au terrain, que le nombre des unités d'enquête a été défini. Dans cette approche, l'ordre de grandeur concernant le taux de sondage est fixé en premier, ici entre 1 et 2 p.100. Ensuite, la taille de l'unité d'enquête et le nombre de celles-ci sont déterminés conjointement, soit 20 segments de 36 ha. Le taux de sondage réel est donc de 1,7 p.100 pour des secteurs d'étude d'environ 40 000 ha.

Bien que ce soient les contraintes de l'enquête qui en réalité dictent la taille et le nombre des segments, il est possible d'affiner les paramètres des unités d'enquête. Si cette adéquation entre physionomie du paysage et paramètres des segments n'a pu être obtenue pour l'enquête support, elle peut toutefois être réalisée a posteriori dans un but de contrôle, comme cela a été notre cas (cf. 7.2.). Il en va de même pour la stratification morphologique, dont les objectifs, précédemment décrits, ne sont pas repris dans la synthèse pratique présentée à la prochaine section. Cette synthèse cadre la méthode retenue, et sa mise en place pratique, pour l'enquête support réalisée en 1988 pour les secteurs pastoraux et agropastoraux de Rosso et Lekseiba¹ et dont les résultats sont développés aux chapitres 8 et 9.

6.2. MÉTHODE RETENUE

Cette description pratique de la méthode retenue pour positionner l'échantillon est valable pour de nombreuses variétés de tirage. Toutefois, elle a été conçue pour un sondage systématique non aligné. On peut donc considérer que la répartition des segments y est équiprobable et sans remise².

Aucune stratification morphologique n'a été réalisée pour cette étude. Les seules strates existantes sont implicites, elles sont géométriques et liées à la méthode de tirage, c'est-à-dire au pas d'échantillonnage du tirage systématique. De même, si l'on souhaite obtenir les résultats d'estimation par unité administrative, comme le tirage est équiprobable, cette stratification a posteriori n'entraînera pas de problème particulier en dehors de celui de l'affectation des segments se trouvant à cheval sur une limite administrative. Un segment ne doit en effet appartenir qu'à une seule strate.

¹DE WISPELAERE 1989

²GOURIEROUX 1981 p.115

Dans cette phase de recherche méthodologique, nous n'avons pas pu publier de résultats au niveau d'une quelconque unité administrative. Les zones d'enquête étaient trop petites pour que cela soit réalisable.

6.2.1. Tirage de l'échantillon

Pour que le sondage systématique soit considéré comme un sondage aléatoire, il faut que la base de la progression arithmétique soit déterminée par tirage au hasard¹ et que la répartition des objets inventoriés ne présente pas de structures particulières. Nous avons donc procédé au tirage des coordonnées du point origine A (0 ; 0) pour chacune des deux zones d'étude à l'aide d'un générateur de nombres pseudo-aléatoires du type calculette HP 11C.

Ces coordonnées dans le système international sont :

- pour Rosso A (0 ; 0) = (16°40' N ; 15°46' W) ;
- pour Lekseiba A (0 ; 0) = (16°02' N ; 13°13' W).

A partir de ces points, un carroyage est développé, il représente la maille du sondage systématique. Son pas peut être défini comme précédemment ou comme nous allons le voir.

En enquêtant de grands territoires d'environ 600 000 ha, comme la Seine-et-Marne, le SCEES² a pu utiliser des taux de sondage inférieurs au nôtre, car avec un taux de 1 p.100, l'échantillon totalisait encore 120 segments. Sur ce secteur de grands parcellaires, cet organisme a retenu une taille de segment d'environ 50 ha. Dans ce cas, pour matérialiser un taux de sondage de 1 p.100, il faut que le segment puisse être tiré à l'intérieur d'une maille, ou strate géométrique, de 5 000 ha.

Lors des préparatifs de l'enquête, nous avons aussi retenu un taux de sondage de 1 p.100. De ce fait, avec des segments de 36 ha, soit 600 m de côté, il fallait construire un carroyage dont la maille faisait 6 000 m de côté, soit 3 600 ha. Une fois le pas de la maille défini, ce carroyage a été développé sur l'ensemble de la zone d'étude à partir du point origine A (cf. fig. 6.3).

Le tirage des coordonnées de chaque segment est particulièrement fastidieux. Pour limiter cette phase, toutes les mailles ont été regroupées par bloc de quatre. Dans notre cas, ce bloc mesure 12 km de côté, c'est donc un carré de quatre mailles,

¹DESABIE 1966 p.98

²FOURNIER 1986 p.15

soit $2 * 6\ 000$ m de côté. Chaque bloc est numéroté, et chacune des mailles élémentaires est désignée par la lettre : a, b, c ou d. Le bloc origine est centré sur le point origine A, mais les blocs sont numérotés à partir du coin situé au NW du dispositif (cf. fig. 6.3). Les blocs ainsi définis déterminent quatre ensembles de carrés numérotés respectivement :

1a	1b	1c	1d
2a	2b	2c	2d
3a	3b	3c	3d
...
ma	mb	mc	md
...

A l'intérieur de ces quatre sous-ensembles (a, b, c, ou d) de l'échantillon primaire, un tirage indépendant est effectué. Il consiste à tirer pour chaque sous-ensemble deux nombres compris entre 1 et 300 à l'aide du générateur de nombres pseudo-aléatoires, 300 correspond au nombre de pixels de 20 m compris dans 6 000 m.

Pour Rosso et Lekseiba, les paires de coordonnées suivantes ont été tirées :

Rosso a (88 ; 22), b (06 ; 90), c (116 ; 06) et d (42 ; 24) ;

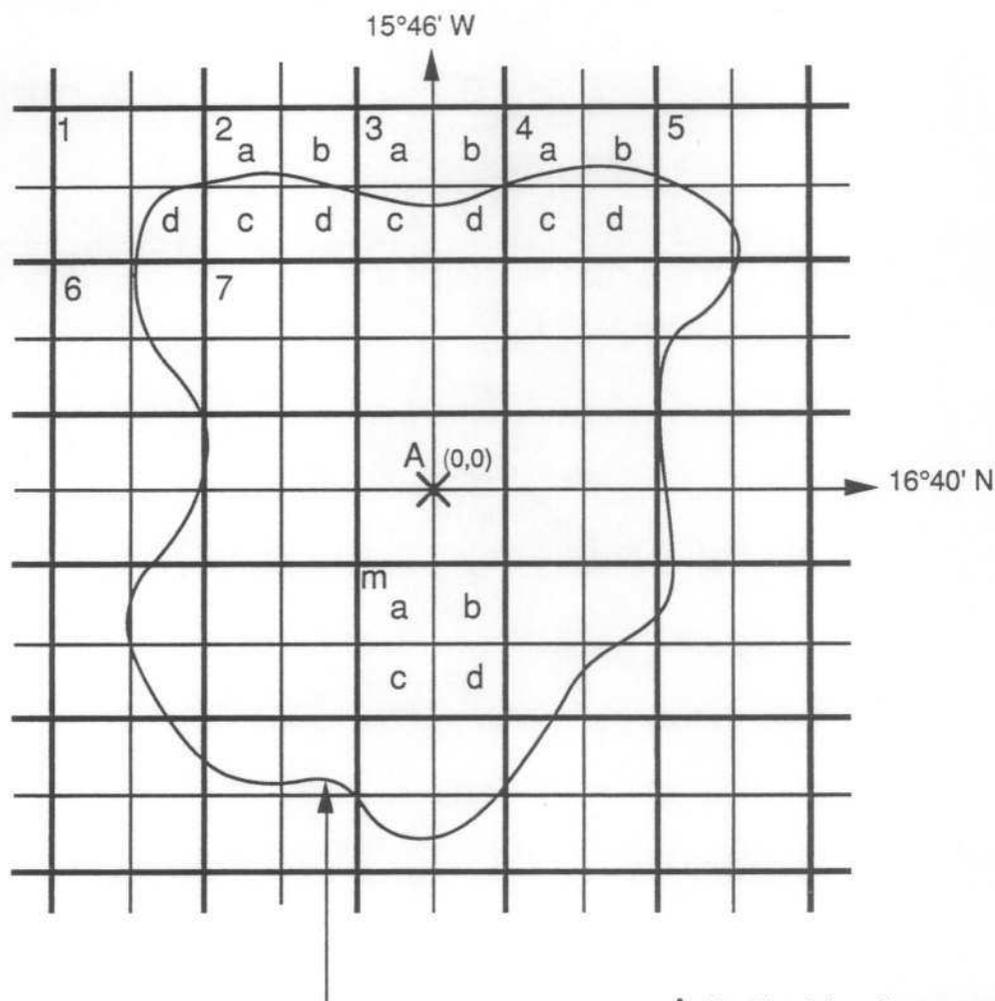
Lekseiba a (35 ; 03), b (69 ; 65), c (12 ; 31) et d (07 ; 110).

Elles permettent, à partir du coin NW de chaque carré de la répétition a, b, c ou d, de localiser le coin NW du segment.

Il est possible de considérer que l'on dispose de quatre sous-échantillons indépendants (a, b, c et d), dont le tirage est systématique et non aligné. La grille support suit effectivement une progression arithmétique, mais sa régularité est contrariée par l'introduction d'un élément aléatoire dans le positionnement des segments des répétitions a, b, c et d.

Bien que cette procédure de tirage systématique non aligné soit moins rigoureuse que celle présentée au point 4.2.2.2., elle présente cependant l'avantage d'être moins contraignante dans sa réalisation. Si toutefois une périodicité de l'ordre de la taille du bloc se présentait, 12 km dans notre cas, elle n'affecterait certainement pas les quatre répétitions. Il serait alors possible de supprimer la répétition affectée par cette périodicité et de conserver les trois autres pour achever l'inventaire.

figure 6.3 - Implantation des segments, phase pratique

La grille de sondage

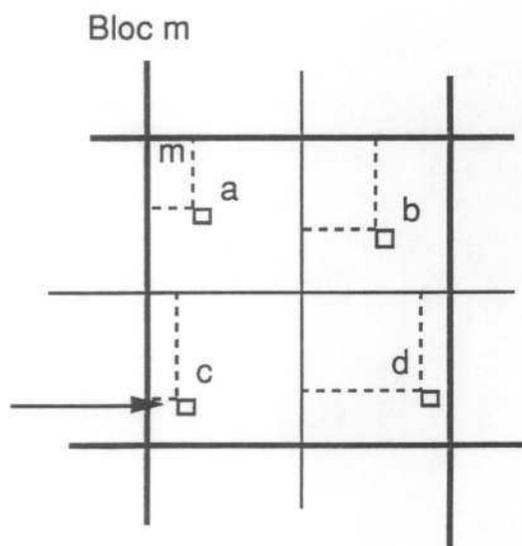
Limite de la zone d'étude

A (0 ; 0) origine du carroyage de ROSSO pour le tirage des segments

Implantation des segments

Un bloc est constitué de 4 carreaux élémentaires de 6 km de côté. La répartition des segments est identique d'un bloc à l'autre

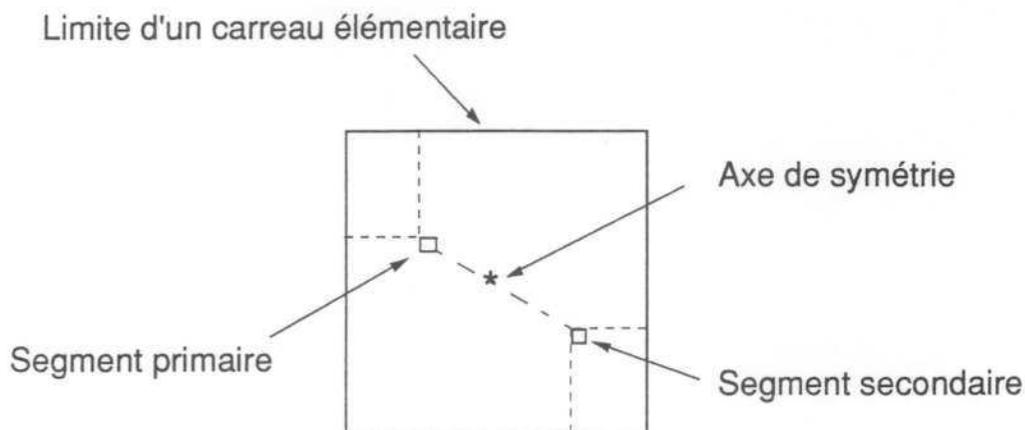
Segment d'enquête mc



Cette procédure de tirage aurait été parfaitement adaptée si nous n'avions pas traité des zones d'étude de petite taille. En effet, un taux de 1 p.100 ne permet pas d'atteindre les 20 segments minimum que nous nous étions fixé, car avec des blocs de 12 km de côté, au mieux, il est possible de tirer 16 segments dans une zone d'étude de 20 km de côté. Malgré cette limitation de la méthode, il nous a été possible de contourner le problème.

Ph. Fournier¹ propose en cas de représentativité trop faible de doubler l'échantillon initial à partir de l'échantillon primaire : «... le doublement a été réalisé par carré élémentaire (a, b, c, d) en tirant le point symétrique du point tiré au hasard dans ce carré par rapport au centre du carré.» (cf. fig. 6.4). Ce deuxième point n'est retenu que si le segment tombe en entier dans la zone d'étude et s'il ne chevauche pas le segment primaire.

figure 6.4 - Renforcement de l'échantillon



On voit tout de suite l'avantage d'un tel système qui, sans modifier la procédure de tirage, permet de renforcer un échantillon trop léger. Cette opération est possible sur toute les répétitions, comme dans notre cas, ou uniquement sur quelques-unes. Elle est de même possible sur l'ensemble de la zone d'étude ou seulement sur certaines strates, etc. A l'inverse, en phase opérationnelle avec un grand nombre de segments, il est possible de supprimer une ou plusieurs répétitions pour alléger l'échantillon. Cette méthode offre donc une grande souplesse d'action, car toutes les modifications sont réalisables en cours d'enquête moyennant un peu de rigueur.

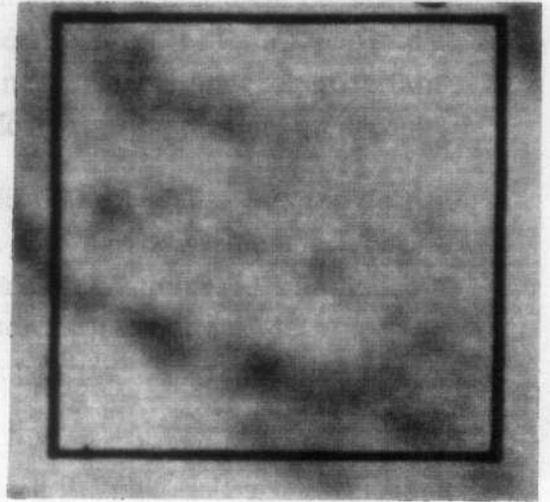
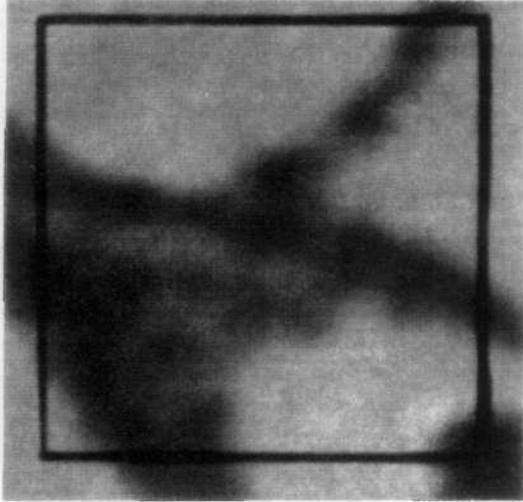
¹FOURNIER 1986 p.17

planche photo 6.1 - La différence de contraste des documents de terrain (deux segments de la zone pilote de Lekseiba)

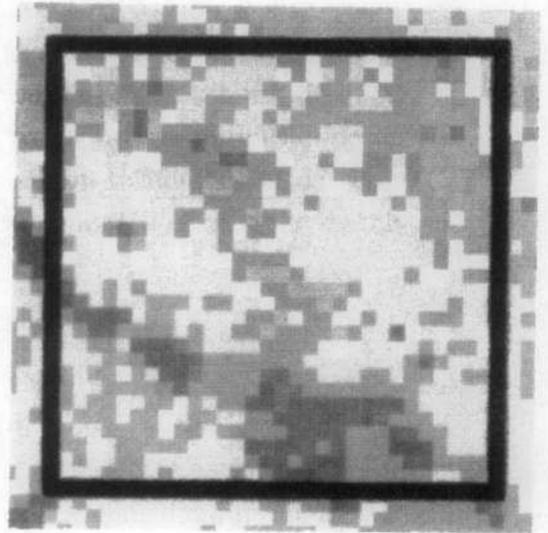
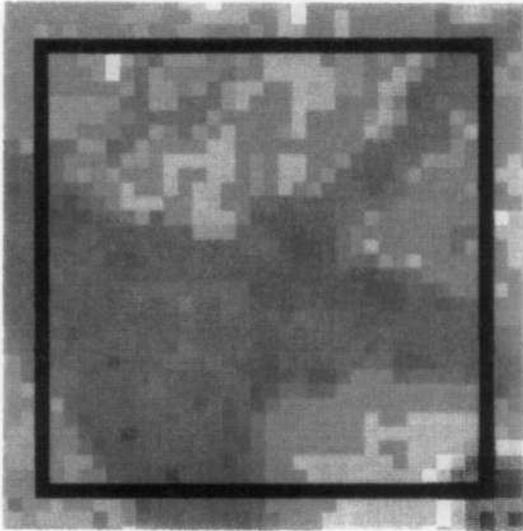
K5D

Origine et coefficient des agrandissements

K5C

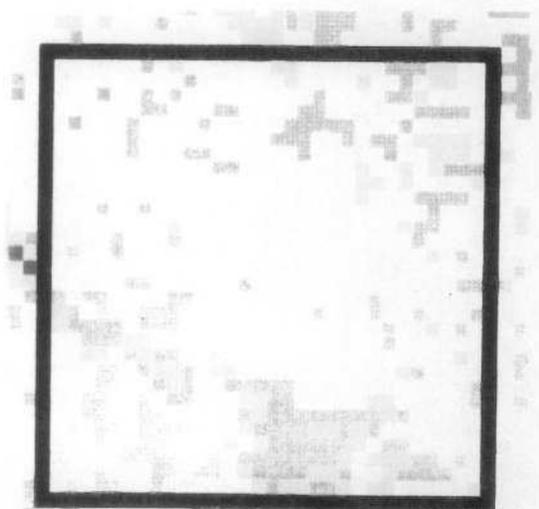
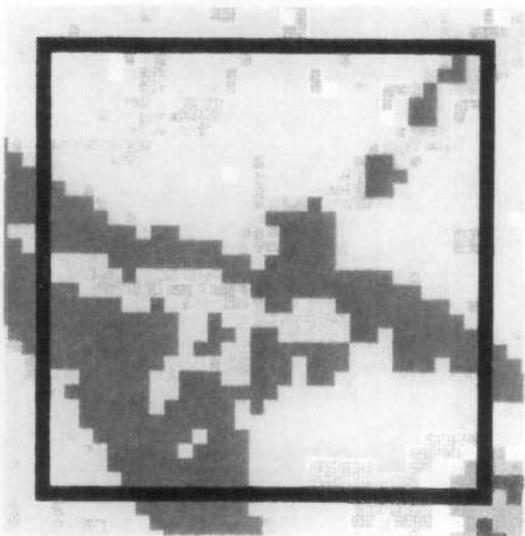


Analogique
(x 40)



Composition colorée
(x 12)
(cf. fig. A.4.2)

0 200 m



Classification préparatoire
(x 12)
(cf. fig. 7.3)

6.2.2. Réalisation

Deux procédures ont été testées pour réaliser le sondage. La première a utilisé des documents analogiques comme support et la seconde des documents numériques. Bien que la mise en œuvre soit très proche dans les deux cas, de nombreux arguments sont en faveur de l'utilisation des documents numériques comme base de sondage, support d'enquête, etc. Nous allons toutefois décrire la procédure à partir d'un document photographique car elle est à l'origine de la méthode et matérialise efficacement les étapes. De plus, la procédure sur documents numériques en découle.

Un agrandissement photographique au 1/50 000 est réalisé à partir du film positif au 1/400 000 couvrant la zone d'étude. Cet agrandissement est ensuite "habillé" d'un transparent sur lequel sont reportées les amorces des latitudes et longitudes du système international. Ces amorces permettent de tracer les principaux parallèles et méridiens. Puis, le point origine A est localisé par ses coordonnées.

A partir du point origine, est développée la grille matérialisant les blocs de 12 km de côté (24 cm) et leurs subdivisions, les carreaux de 6 km de côté (12 cm). Ce maillage s'appuie sur les parallèles et les méridiens. La position des segments est connue en pixels (cf. *supra*), il suffit de la convertir en mètres pour les implanter. Pour faciliter la localisation du coin NW du segment qui sert de point de départ au tracé de toutes les unités d'enquête, nous avons utilisé une feuille de papier millimétré. Elle permet de trouver facilement la position recherchée et de conserver aisément l'orthogonalité requise pour le positionnement à l'intérieur de chaque carreau.

Ensuite, toujours selon le même principe, les segments, petits carrés de 12 mm de côté, sont tracés à l'aide d'un gabarit. Notons que, contrairement aux précédentes étapes, ils sont tracés directement sur l'agrandissement photographique, car un deuxième agrandissement est réalisé uniquement sur les unités d'enquête. Il consiste à amener chaque petit segment dessiné au 1/50 000 à l'échelle du 1/10 000 pour servir de document support d'enquête. A cette échelle, le segment mesure 6 cm de côté (cf. pl. photo. 6.1).

La description de ces différentes étapes est là pour rappeler qu'une mission doit se préparer longtemps avant d'aller sur le terrain car elle nécessite beaucoup de soins pour être efficace. On pourrait croire d'ailleurs que ces nombreuses étapes nuisent à la qualité du tirage avec l'introduction d'erreurs. Or, comme le fait remarquer Ph. Fournier¹ : «... *les erreurs de localisation pouvant être introduites lors de cette [...] phase n'altèrent aucunement le caractère aléatoire du tirage.*».

¹FOURNIER 1986 p.21

En revanche, la multiplication des étapes, indispensable pour pouvoir utiliser des documents analogiques comme base de sondage, pose de nombreux problèmes. En dehors de l'aspect localisation, qui sera abordé plus loin (cf. 6.3.1.), la qualité visuelle du document d'enquête est le principal problème de cette méthode. Pour réaliser un agrandissement de 40 fois, rappelons que l'on passe du 1/400 000 au 1/10 000, il faut obligatoirement réaliser un internégatif. Le résultat final devient alors difficile à analyser, la dynamique de l'image est très faible et l'aspect granuleux très marqué (cf. pl. photo. 6.1).

L'altération des qualités radiométriques de l'image va nuire à l'enquête dans la mesure où elle va gommer les différences entre les éléments du paysage, en dehors des milieux très tranchés et se côtoyant à l'intérieur du segment. Le report d'information, entre ce qui est observé sur le terrain et son extension sur la photographie, va être délicat et par là-même sujet à erreur. Ces erreurs vont être difficiles à apprécier et à annuler, elles vont donc renforcer la part des erreurs d'observation déjà commises. De même, elles se verront aggravées lors du transfert du document analogique, l'agrandissement photographique sur lequel ont été localisés les résultats de l'inventaire, vers le document numérique pour les traitements.

Pour toutes ces raisons, il est apparu préférable de recourir aux documents numériques tout au long de la chaîne des travaux d'enquête. Il faut encore noter que l'absence de changement de support, tout se fait à l'écran et en repère, permet non seulement de gagner un temps précieux sur la réalisation, mais aussi limite les erreurs de localisation. De plus, "le numérique" permet l'édition de documents de terrain bien plus utiles car plus contrastés que ceux produits photographiquement. Enfin, nous en aurons fini lorsque nous aurons mentionné ce qui est réellement discernable sur l'imagerie satellitaire, en fonction du contraste du document support d'enquête.

6.2.3. Nomenclature et niveau d'observation

Sur le terrain, le chercheur dispose donc d'un agrandissement photographique au 1/50 000 sur lequel sont localisés tous les segments. Ce document donne un aperçu général du paysage et la route à suivre pour rallier chaque segment. Il fait office de carte topographique. Les cartes au 1/200 000 sont trop peu précises pour remplir ce rôle.

Il dispose aussi d'un agrandissement au 1/10 000 de chaque segment. Nous avons pris soin de ne pas isoler le segment de son contexte paysager pour faciliter l'approche finale du segment. Cet agrandissement photographique ou numérique est équipé d'un film transparent sur lequel sont portées ou localisées les observations de

l'enquête. Ce support d'enquête pourrait être confié à des photographies aériennes si une couverture récente et avec une échelle suffisante existait. Dans ce cas l'échelle du document pourrait être plus grande et la finesse des prélèvements plus élevée. Le SCEES¹ utilise pour sa part des agrandissements de photographies aériennes variant entre le 1/5 000 et le 1/7 500. La finesse de ce document est largement supérieure à celle de son équivalent satellitaire.

On bute toutefois assez rapidement sur les limites de la télédétection. En effet, dans notre cas (SPOT XS), la résolution du pixel est de 20 m, son influence va être déterminante sur le niveau d'observation. Logiquement, les éléments linéaires de moins de 20 m de large ou les éléments compacts de moins de 400 m² ne sont pas pris en compte. Cependant, comme cela est signalé dans les *Instructions aux enquêteurs* du SCEES² «... une juxtaposition de tels éléments peut constituer une distance supérieure à 20 m ou une surface de plus de 400 m².».

L'ensemble ainsi constitué sera hétérogène et ignoré à moins de couvrir une surface importante et de se répéter un nombre élevé de fois dans le paysage. De toute façon, son individualisation thématique sera complexe, et seule une approche texturale pourra peut-être mettre en évidence cet ensemble. Comme cela a déjà été signalé (cf. 6.2.1.2.), nous avons pour notre part rarement pu identifier des objets compacts d'une taille inférieure à trois pixels de côté.

Il ne faut toutefois pas perdre de vue que ces chiffres sont valables dans le cas de documents d'enquête très fins et très contrastés. Pour les agrandissements photographiques de documents satellitaires, en raison du faible contraste (cf. pl. photo. 6.1), il semble difficile de retenir des chiffres aussi précis. En revanche, les agrandissements de sorties numériques permettent d'individualiser les pixels. Il reste toutefois à résoudre le problème de la localisation.

Les niveaux d'intervention retenus au chapitre 5. (cf. 5.2.1.), pour réaliser les inventaires d'occupation du sol dans une optique pastorale, doivent tenir compte des problèmes liés à la qualité du document d'enquête et au positionnement du relevé sur celui-ci. Ces problèmes révélés ou confirmés par la mise en place pratique du sondage spatial vont devoir être étudiés (cf. 6.3.) pour qu'enfin soit réalisée l'intégration des méthodes aréolaires dans les différentes phases des inventaires. C'est à cette condition que l'on pourra considérer l'intégration comme réalisable et qu'il sera possible d'en tester l'opérationnalité.

¹SCEES 1987 p.1

²SCEES 1987 p.2

6.3. LOCALISATION ET AIRES MINIMALES D'OBSERVATION

Cette dernière section, concernant le protocole d'enquête, a été spécialement développée pour le milieu naturel. Elle n'est pas exclusivement destinée aux milieux tropicaux. Elle peut convenir dans sa démarche à tous les chercheurs dont l'activité se situe hors des zones anthropisées.

En effet, là où les concentrations humaines sont fortes, le paysage est marqué, voire morcellé par l'homme, îlots urbains, parcellaire agricole, etc. Cette caractéristique du paysage a été utilisée par tous les chercheurs pour se localiser, car ce morcellement a une assez grande permanence temporelle et de plus il est en général visible sur les photographies aériennes ou les documents satellitaires. Ces propriétés sont utilisées aussi bien en statistique agricole¹ qu'en démographie urbaine² lorsque les enquêtes sont réalisées par des méthodes aréolaires. L'opérateur se déplace de parcelle agricole en parcelle agricole ou d'îlot urbain en îlot urbain.

En revanche en milieu naturel, il n'y a pas de ruptures aussi brusques lorsque l'on passe d'une formation à l'autre. La localisation est beaucoup moins aisée, voire incertaine, que lorsque l'on passe d'une parcelle agricole à une autre. De plus, le relevé, qu'il soit qualitatif ou quantitatif, doit être effectué dans une formation homogène qu'il est possible de situer précisément sur le document d'enquête. Pour toutes ces raisons, il a fallu développer une réflexion spécifique au milieu naturel valable pour les zones arides et semi-arides.

6.3.1. Les nouveaux moyens de localisation

Jusqu'à présent, les chercheurs ne disposaient bien souvent que du compteur kilométrique du véhicule, d'une boussole, d'un podomètre, voire d'une bobine à fil perdu de type Topofil pour se localiser sur le terrain. Cela a été notre cas pour les campagnes de terrain de cette étude. Dans ces conditions, il est parfois très difficile d'apprécier l'exactitude de sa position, sauf dans les rares zones de parcellaire agricole de type "culture irriguée". En zone peu contrastée, on est souvent, et sans qu'il soit possible de le préciser, à plusieurs dizaines, voire centaines de mètres de la position voulue.

Actuellement, pour un coût très faible, en moyenne moins de 30 000 FF TTC, il existe des localisateurs par satellite, encore appelés navigateurs par satellite, qui permettent de se positionner à moins de 100 mètres près. Ces petits appareils

¹FOURNIER 1986 p.24

²DUREAU 1989

destinés au départ à la navigation de plaisance sont très légers, moins de cinq kilogrammes en état de marche, autonomes, ils fonctionnent aussi bien sur accumulateurs que sur batteries et ne sont pas reliés à un quelconque compteur kilométrique de véhicule comme le sont les Satnav, Loran et autres localisateurs des générations antérieures. Il existe des localisateurs beaucoup plus performants et plus chers destinés, entre autres, aux géodésiens ; leur précision est de l'ordre du millimètre.

Cette nouvelle génération de localisateurs satellitaires utilise le système NAVSTAR plus connu sous le nom de GPS (*Global Positioning System*). Il est possible d'en décrire sommairement le fonctionnement. L'appareil réceptionne les signaux émis par les différents satellites NAVSTAR présents au-dessus de l'horizon. Avec trois satellites en configuration, il détermine par triangulation sa position en latitude et longitude, et avec quatre, il fournit en plus l'altitude.

Jusqu'à une époque récente, la guerre du Golfe, le nombre des satellites NAVSTAR en orbite était assez restreint dans le ciel de certaines parties du monde. La qualité des signaux reçus s'en ressentait, la précision pouvait être mauvaise et à certains moments de la journée il était impossible de se localiser faute de satellites émetteurs en configuration.

Avec les événements du Moyen Orient, les Etats-Unis ont multiplié les lancements de satellites, dont ceux de type NAVSTAR pour la localisation des troupes. Il y en aurait actuellement (mars 1991) 16 en activité¹ permettant ainsi de travailler pratiquement en continu sur la journée et en trois dimensions (3D), c'est-à-dire latitude, longitude et altitude. Il en faut un minimum de 12 pour travailler en continu mais seulement en deux dimensions² (2D). De plus, d'après un géodésien de l'IGN la dégradation des signaux qui devait être appliquée aux récepteurs civils (code C/A) n'a pas eu lieu pendant la guerre. On peut donc espérer travailler actuellement au plus près des spécificités techniques des récepteurs, c'est-à-dire avec une précision de l'ordre de 30 m. Notons toutefois que localement, cette précision peut être moins bonne en raison de conditions particulières (mauvaises configurations spatiales, écrans, etc.).

Il est manifeste que ce type d'appareil, peu coûteux, léger et précis, est l'outil idéal pour se localiser sur le terrain avec une précision compatible avec nos exigences. D'une part ces localisateurs permettent de se positionner, mais d'autre part ils offrent la possibilité de se guider vers une zone dont on leur aura au préalable indiqué les coordonnées, un segment par exemple. Il n'y a donc plus en théorie d'obstacle pour réaliser des enquêtes où l'échantillon est tiré aléatoirement.

¹BAUDET 1991

²STANSELL 1988 p.58

Lors des enquêtes support, nous ne disposions pas de ce type d'appareil. Les résultats publiés dans le rapport d'enquête¹ et repris pour partie dans cette thèse sont entachés d'une erreur inconnue, erreur d'observation liée à une imprécision du positionnement des relevés. Cette erreur pourra dans le futur être éliminée par l'emploi systématique d'un localisateur par satellite, et cela dès que l'enquête de terrain se déroulera en milieu naturel, tropical ou non. Dans certains cas, le chercheur continuera de se localiser plus vite avec des moyens traditionnels, mais il aura toujours la possibilité ultérieurement de contrôler sa position, s'il a pris soin d'effectuer un relevé de celle-ci lors de l'enquête, alors que ceci est difficilement réalisable avec des moyens classiques.

Il faut toutefois rester prudent quant à l'utilisation de ce type d'appareil. Malgré sa très grande précision, il ne permet pas d'enquêter n'importe quel objet. Celui-ci doit avoir une taille minimale qui reste à déterminer.

6.3.2. Aire minimale d'observation

Ce concept n'est pas totalement indépendant de celui développé au point 5.2.2. sur l'aire minimale du relevé. Celle-ci fait uniquement référence à une zone homogène quant à la physionomie de la végétation, alors que l'aire minimale d'observation ajoute à cette notion celle de la précision du positionnement. Il faut donc distinguer deux cas en fonction des documents d'enquête utilisés.

6.3.2.1. Précision de la documentation satellitaire analogique

Les données satellitaires sont relativement coûteuses. De ce fait, la plupart des utilisateurs les achètent avec un niveau de traitement minimal, de type 1B. Tel quel, celui-ci permet de s'orienter sur le terrain, surtout avec des agrandissements photographiques au 1/50 000. En revanche, il ne permet pas d'utiliser avec efficacité de localisateur par satellite puis de positionner avec précision les données collectées, car ce niveau de traitement ne comporte pas de mise en géométrie et la précision moyenne des amorces du carroyage géographique (pour les films et tirages photographiques) est assez faible.

¹DE WISPELAERE 1989

En effet, la documentation SPOT¹ indique pour le niveau de traitement 1B que, pour 68 p.100 des scènes testées, la localisation des amorces du carroyage géographique est à moins de 510 mètres de leur position réelle, mais que dans 32 p.100 des cas, elle est au-delà, cela après deux années de vol et 93 scènes testées. La localisation géographique des scènes testées n'est pas précisée. Il n'est donc pas question de localiser précisément les relevés de terrain avec ce type de documents. Il faut soit utiliser un document photographique en niveau 2B, produit dit géocodé que l'on peut superposer à une carte au 1/50 000 (exceptionnel en Afrique tropicale), soit effectuer une mise en géométrie du fichier numérique de niveau 1B.

Le niveau 2B offre pour sa part dans 68 p.100 des cas (sur seulement 8 images testées après deux ans de vol) des amorces de carroyage géographiques positionnées sur les films à moins de 8 mètres de leur position réelle². Il en coûte, pour la mise en géométrie offerte par le niveau 2B, 19 150 FF HT au lieu de 11 700 FF HT pour le niveau 1B, toujours en multispectral (prix catalogue juillet 1990). Il peut donc être intéressant de payer les 7 450 FF HT supplémentaires, si les cartes topographiques au 1/50 000 existent, pour obtenir ce gain de précision. Sinon, il faut effectuer soi-même la mise en géométrie du fichier numérique. C'est ce que nous avons fait, non pour l'enquête, comme cela a déjà été précisé, mais pour les résultats publiés dans le rapport³. C'est une raison supplémentaire pour recourir aux documents satellitaires numériques.

6.3.2.2. *Précision du document satellitaire numérique*

La mise en géométrie réalisable sur le Péricolor 2001 de l'IEMVT est de type polynomiale du premier degré. Le résultat en terrain peu accidenté reste donc satisfaisant, bien qu'en l'absence d'information sur les vecteurs de déformation, il soit difficile d'apprécier l'approximation réalisée lors de la mise en géométrie. Précisons que celle-ci est effectuée par recherche de points d'amer sur une carte topographique et sur l'image numérique.

La société SPOT Image effectue cette opération avec des modèles de déformation beaucoup plus complexes et avec des documents topographiques plus adaptés à ce travail que ceux dont nous disposions. De ce fait, il ne faut pas espérer atteindre la précision du niveau 2B qui est de l'ordre de huit mètres. Cet excellent résultat est probablement obtenu sur des zones où il existe une cartographie précise et à grande échelle. La prise des points d'amer se fait normalement pour le niveau 2B

¹SPOT 1986 vol. 2, A-03-13

²SPOT 1986 vol. 2, A-03-13

³DE WISPELAERE 1989 cartes hors-texte

avec du 1/50 000. En Afrique de l'ouest, il est exceptionnel de disposer de références topographiques autres que les cartes au 1/200 000. Que les modèles de déformation soient simples ou complexes, dans le cas du 1/200 000, l'échelle du document de référence produit certainement des résultats de valeurs comparables quant à la précision de la localisation.

Avant de décrire les aspects nous concernant de la mise en géométrie du document satellitaire destiné à l'enquête de terrain, il nous a semblé utile de préciser le sens de deux termes auxquels il va être fait référence dans le prochain développement. Il s'agit de **l'erreur graphique** et de **l'exactitude dimensionnelle**. J. Bertin¹ les définit comme suit :

- « *l'erreur graphique est la différence entre la longueur qui est lue et la longueur qui devrait être lue.* » ;
- « *l'exactitude dimensionnelle est la signification métrique de la précision graphique.* ».

De même, il ajoute que la **précision graphique** est une constante qui caractérise le document donné, « *elle est irréductible et s'exprime par une dimension absolue : le 1/10, le 1/4, le 1/2, le mm ...* ». Pour toutes ces raisons, nous avons estimé la précision de notre correction géométrique en additionnant les erreurs ou imprécisions introduites tout au long des traitements.

Il est admis que la précision d'un dessinateur cartographe est de l'ordre du 1/10 de millimètre², mais comme le signale R. Cuenin³ : « *compte tenu des opérations de reproduction et d'impression [...], l'erreur moyenne résultante sur l'épreuve imprimée peut être évaluée à 2/10 mm.* ». Au 1/200 000, l'exactitude dimensionnelle est de 40 m (2/10 de mm au 1/200 000). Ainsi, tout pointage sur le 1/200 000 pour lever les coordonnées d'un amer se fait-il avec une première imprécision de 40 m.

La lecture des coordonnées va se faire pour deux raisons sur le carroyage UTM (Universal Transverse Mercator grid) qui équipe ces cartes. Ce carroyage kilométrique facilite les conversions entre les distances et les pixels de 20 m. Il est uniformément réparti, tout du moins ses amorces, sur l'ensemble de la carte. Il est donc proche de chaque point d'amer et lors de la lecture de leurs deux coordonnées, il est possible de négliger la déformation du papier. Toutefois la lecture des coordonnées, lors de la prise de points d'amer, entraîne une nouvelle imprécision qu'il est difficile de négliger.

¹BERTIN 1973 : 298-299

²BERTIN 1973 p.298

³CUENIN 1972 tome 1, p.79

Cette mesure s'effectue sur la carte à l'aide d'une règle qui, dans le meilleur des cas, est graduée en demi-millimètres. Dans l'hypothèse où celle-ci est exacte, l'erreur de lecture n'excédera pas le 1/4 de millimètre, soit une exactitude dimensionnelle de 50 m au 1/200 000.

Enfin, la correction géométrique elle-même, n'est pas indemne de déformation. Il semblerait, bien que ceci n'ait pas de valeur statistique, que cette correction ait une précision qui tourne autour du demi-pixel, soit 10 m.

L'exactitude dimensionnelle de la correction géométrique effectuée pour publier les résultats de l'inventaire d'occupation du sol et ceux de l'évaluation des pâturages du projet support¹, à l'origine de cette recherche, correspond à la somme des précisions précédemment définies. Pour les conditions décrites, l'exactitude dimensionnelle de la correction géométrique est de l'ordre de 100 m, soit 5 pixels SPOT. Il faut donc considérer que les cartes publiées pour ce rapport ont une précision graphique de l'ordre de deux millimètres pour les cartes d'occupation du sol au 1/50 000 et de un millimètre pour les cartes de ressources pastorales au 1/100 000.

En conséquence, un objet quelconque sur ces cartes connaît un écart topographique faible entre sa position observée et sa position réelle. Cet écart est évidemment supérieur à celui qui aurait été observé directement sur la carte topographique de référence si cela avait été possible. Cependant, une carte topographique n'est pas une carte thématique, il faut donc, au moins dans le cas présent, accepter une légère dégradation de la localisation pour représenter spatialement les différents thèmes enquêtés. **Notons toutefois que la précision graphique ne permet pas de tirer de conclusion sur la précision thématique du document. Elle ne renseigne que d'une manière détournée sur la qualité globale de celui-ci ainsi que la rigueur qui a régi son élaboration.**

Pour être complet, il faut rapprocher l'exactitude dimensionnelle des documents sus-cités (100 m) de celle du carroyage géographique des documents SPOT en niveau 1B, 510 m en moyenne. A notre sens la mise en géométrie de la cartographie se justifiait. Si cela avait été possible avec une cartographie topographique de référence au 1/50 000, l'exactitude dimensionnelle aurait été d'environ 30 m (10 m + 12,5 m + 10 m, cf. *supra*). Cela justifierait d'autant plus le recours sur le terrain à la notion d'aire minimale d'observation.

¹DE WISPELAERE 1989

6.3.2.3. *Justification de l'aire minimale d'observation*

Comme cela a déjà été démontré, les problèmes de repérage, de localisation, de précision du document d'enquête, etc., rendent impossible l'inventaire d'un pixel isolé. La probabilité d'affectation du relevé de terrain vers un pixel isolé est très faible. Il est généralement admis que l'identification d'un objet sur le document satellitaire n'est effective qu'au-delà d'une forme compacte de neuf pixels. On a donc intérêt à enquêter sur le terrain des zones appréciées comme homogènes sous certains critères (cf. 5.2.), puis à réaliser l'affectation terrain-pixels par groupes d'au moins neuf pixels. Cependant, la taille de cette aire minimale théorique d'observation a plutôt été avancée pour des enquêtes en milieu agricole tempéré. Il nous a paru préférable de rechercher une méthode d'évaluation plus générale qui prenne en compte aussi bien les problèmes de localisation que la résolution du capteur.

C.O. Justice et J.R.G. Townshend¹ proposent de déterminer cette aire minimale par la formule suivante :

$$C = L(1 + 2N)$$

où C est le côté de l'aire minimale d'observation, L la taille du pixel, soit 20 m pour SPOT XS, et N la précision globale de la localisation des observations, en pixels. Le facteur qui nous intéresse ici est donc N, il est fonction du document support d'enquête et de la précision de la localisation sur le terrain.

Cette formule, relativement empirique il est vrai, n'a pas encore connu un grand succès auprès des "télé-détecteurs". Ceci est probablement lié à une diffusion encore très faible des localisateurs satellitaires, les seuls qui permettent une connaissance non subjective de N. Nous sommes toutefois conscients que les résultats issus de cette formule doivent plus être considérés comme des ordres de grandeur que comme des valeurs intangibles. C'est dans cette optique que nous les présentons.

Deux cas de figure peuvent se présenter. Dans le cas le plus favorable, le chercheur est équipé d'un localisateur satellitaire. Il est donc possible de déterminer une aire minimale d'observation que l'on qualifiera "d'absolue". En l'absence de localisateur, ou en raison d'une mauvaise configuration (cf. infra), on parlera alors d'aire minimale relative.

¹JUSTICE 1981 p. 43

- *Aire minimale absolue*

A l'exactitude dimensionnelle définie précédemment (cf. 6.3.2.2.), il convient d'ajouter la précision de la localisation par le système GPS. Avec le type d'appareil qui nous concerne (mono-fréquence) et notre statut de civil (code C/A), nous allons osciller dans un futur proche entre deux types de précision. Tous les deux issus du niveau standard actuel SPS (*Standard Positioning Service*), l'un gardera la précision standard du SPS, tandis que l'autre n'en fournira plus qu'une position dégradée. Cette réduction de la précision par dégradation des paramètres d'orbite et déstabilisation des horloges embarquées sera le fait du département de la Défense des USA¹ en fonction de considérations militaires. Seuls certains utilisateurs accrédités conserveront la précision maximale. Rappelons que cette dégradation n'a pas eu lieu pendant la guerre du Golfe et qu'il est difficile de savoir à quel moment elle sera effective.

Nous avons de ce fait retenu deux niveaux de précision dans le positionnement par satellite, l'un en standard, l'autre en dégradé. En standard, la précision est de 30 m, soit la précision optimale annoncée par le fabricant du localisateur utilisé. En dégradé, la précision est de 100 m. Ce dernier chiffre est la probabilité d'erreur radiale (distribution de Raleigh) à 95 p.100². Cela signifie que dans 95 p.100 des cas, la précision sera meilleure que 100 m.

De plus, nous avons complété le tableau 6.4 en lui ajoutant les valeurs correspondant à une précision à 50 m, c'est la probabilité d'erreur radiale à 50 p.100 en niveau SPS dégradé. Ce niveau correspond à un moyen terme probable entre la période actuelle, où la précision de localisation est optimale, et un futur possible, où la précision pourrait être en moyenne de cet ordre. Ces trois niveaux de précision GPS sont donnés pour une exactitude dimensionnelle de 30 m, la meilleure mais très rare en Afrique de l'ouest (cf. 6.3.2.2.) et une exactitude de 100 m, plus "standard" en fonction des documents topographiques disponibles.

En fonction des différentes configurations, combinaisons entre l'exactitude dimensionnelle et le niveau de précision du positionnement GPS, la longueur du côté de l'aire minimale C peut varier du simple au triple, c'est le cas entre les deux configurations extrêmes (A et F), où l'on passe de 140 m à 420 m. Cela signifie que dans la configuration A, il est possible d'implanter la parcelle, l'unité d'observation, au centre d'une aire homogène de 140 m de côté, soit environ 2 ha, tandis que pour F, cette aire fera 420 m de côté soit environ 18 ha.

¹STANSELL 1988 p.60

²STANSELL 1988 p.59

tableau 6.4 - Aires minimales absolues d'observation

Configuration	A	B	C	D	E	F
Exact. dimens. en m		30			100	
Précis. loc. GPS en m	30	50	100	30	50	100
N en pixels	3	4	6,5	6,5	7,5	10
C en m	140	180	280	280	320	420
C ² en ha	2	3,2	7,8	7,8	10,2	17,6

Les chiffres indiqués pour la précision de la localisation, ne tiennent pas compte de mauvaises conditions locales de réception (signaux dégradés, mauvaises configurations satellitaires, écrans végétaux trop importants, etc.). Ils sont donc théoriques et localement inférieurs à ceux constatés sur le terrain.

Il apparaît à la consultation du tableau 6.4 qu'il est difficilement concevable d'implanter des sites d'observations dans des aires minimales supérieures à 3,2 ha. En effet, la diversité du milieu naturel sahélien n'offre qu'exceptionnellement une parcelle homogène de plus de trois ou quatre hectares contigus. A titre d'exemple, les parcelles de plus de 10 ha (10,2) ne représentent à Rosso que 2,8 p.100 des parcelles de la zone pilote, 2,1 p.100 à Lekseiba et 1,6 p.100 pour les oasis (cf. tab 7.2).

Si la configuration qui va conditionner l'inventaire, et qui a été préalablement calculée, est autre qu'une des configurations A ou B, il est à notre sens préférable d'abandonner la notion d'aire minimale absolue pour celle d'aire minimale relative. Il pèsera probablement un doute non quantifiable quant à la localisation exacte de certaines parcelles d'observation mais l'inventaire sera réalisable, alors que cela serait impossible avec une aire minimale absolue de 17,6 ha en configuration F.

- Aire minimale relative

Si, comme nous l'avons vu précédemment, le calcul de l'aire minimale absolue avant la mission préconise une configuration comprise entre C et F, ou en l'absence de localisateur, il est préférable de recourir à une localisation par méthode traditionnelle. Le localisateur servira simplement à confirmer que les observations ont eu lieu dans un secteur dont l'étendue a été déterminée par calcul. C'est déjà un net avantage par rapport à l'absence du contrôle de positionnement actuellement en vigueur.

Il convient tout de même de calculer une aire minimale d'observation que l'on qualifie de relative. Le calcul est un peu subjectif car il s'appuie sur une détermination empirique de la précision de la localisation (N) des observations. Ce calcul reprend

l'hypothèse de l'identification effective d'un objet de forme compacte de neuf pixels (cf. *supra*). En milieu naturel, il est toutefois préférable de calculer son étendue avec une marge d'incertitude. C.O. Justice et J.R.G. Townshend¹ préconisent une précision (N) de plus ou moins un demi ou un pixel mais si les conditions de localisation ne sont pas bonnes, il faut accroître ce nombre. De ce fait, nous avons retenu une précision de localisation de plus ou moins trois pixels.

Le côté C de l'aire minimale relative est de :

$$C = 20 (1 + 2 * 3) = 140 \text{ m}$$

sa surface est d'environ deux hectares, l'équivalent de la configuration A de l'aire minimale absolue, avec toutefois une inconnue quant à la qualité de la position de l'aire minimale relative.

C'est une aire minimale relative de deux hectares qui a été utilisée pour sélectionner sur le terrain les sites d'observations à l'intérieur du segment. Une fois l'aire minimale relative localisée par méthodes traditionnelles, la parcelle d'observations a été implantée en son centre. Dans la plupart des cas, sa taille était de cinq pixels de côté, soit un hectare.

On pourrait être amené à conclure qu'il est préférable de se passer du localisateur satellitaire et de son corollaire, l'aire minimale absolue, en raison des complications que cela entraîne. Il n'en est rien car la qualité de l'inventaire repose en grande partie sur la précision de la localisation des sites d'observations. Les moyens d'investigations traditionnels en milieu naturel, dès lors qu'il n'y a plus de points d'amer pour recalibrer sa position (surtout en présence de végétation fermée), ne permettent plus d'apprécier la fiabilité des relevés ni de les contrôler a posteriori, à moins d'un improbable retour sur le terrain. Il faut donc recourir à une localisation par satellite.

Dans de bonnes conditions de positionnement visuel, le localisateur ne sert qu'à confirmer l'aire du relevé pour d'éventuels contrôles. Lorsque les conditions se dégradent, il prend le relais et permet de poursuivre l'inventaire sans perte de précision thématique ou géographique. Cependant ce gain dans la précision du positionnement ne doit pas se perdre au niveau des traitements.

En effet, pour valoriser le localisateur, il faut que les reports d'information se fassent vers un document satellitaire de même "géométrie", c'est-à-dire utilisant le même géoïde de référence. Les relevés sont donc positionnés sur un document ayant

¹JUSTICE 1981 p. 43

subi une correction géométrique. Cependant, celle-ci s'accompagne d'une déformation radiométrique, car la correction géométrique crée de nouveaux pixels dans les zones étirées et en combine d'autres dans les zones comprimées.

Or ces nouveaux pixels ne sont plus l'enregistrement d'un quelconque état de surface mais le reflet d'un algorithme de traitement. On aura donc tout intérêt, pour ne pas biaiser les résultats, à effectuer les classifications, indices, etc. sur les données brutes. Cela signifie qu'il faut pouvoir passer facilement et rapidement du document de terrain en géométrie au document de traitement contenant les données brutes.

Notons que dans la mesure où l'inventaire s'appuie uniquement sur des aires minimales relatives, il n'est plus nécessaire d'utiliser des documents satellitaires en géométrie. Cependant, si travailler avec des documents en niveau 1B n'apporte que peu d'erreurs de localisation pour des paysages à grand parcellaire, type paysage agricole européen où le positionnement se fait de proche en proche, qu'en est-il en milieu naturel où l'on ne perçoit que difficilement les limites de formations ?

Dans la mesure où la précision du positionnement est un des paramètres primordiaux de l'inventaire, tous les éléments qui pourront contribuer à fiabiliser la collecte doivent être mis en œuvre. L'utilisation du localisateur par satellite et la recherche de la configuration la plus performante permettent de sélectionner l'aire minimale la plus restreinte donc la plus opérationnelle. A contrario, l'utilisation de l'aire minimale relative doit être considérée comme un pis-aller, en dehors de conditions particulières (grand parcellaire agricole, forestier, etc.). Elle n'apporte aucune certitude dans le positionnement, ni aucun contrôle a posteriori.

Le concept d'aire minimale que nous venons de décrire a été développé pour les zones pastorales et agropastorales de Rosso et Lekseiba. Il peut aussi s'appliquer à celle des oasis mais il doit être envisagé sous un angle différent dès lors qu'il s'agit de l'appliquer au parcellaire agro-oasien. En effet, une aire de deux hectares dans les palmeraies de l'Assaba est pratiquement exceptionnelle. Or à moins de disposer d'une cartographie au 1/50 000 et de documents satellitaires panchromatiques SPOT, pour établir l'aire minimale d'observation, il est pratiquement exclu d'avoir un positionnement satisfaisant. En revanche, il est plus aisé de s'y localiser de proche en proche qu'en milieu naturel, on pourra donc tabler sur une précision (N) en pixels de l'ordre d'un pixel, voire de deux pixels.

Pour une précision N d'un pixel, le côté de l'aire minimale relative sera de :

$$C = 20 (1 + 2 * 1) = 60 \text{ m}$$

soit une aire de 0,36 ha, et pour deux pixels, le côté de l'aire sera de :

$$C = 20 (1 + 2 * 2) = 100 \text{ m}$$

soit une aire d'un hectare. Il faut bien sûr considérer ces chiffres comme des ordres de grandeurs en raison du caractère empirique de cette approche.

Le choix et le positionnement des aires minimales, qu'elles soient relatives, absolues, destinées aux palmeraies ou au milieu naturel, sont grandement facilités par l'utilisation des classifications automatiques sur lesquelles les unités d'échantillonnage auront été tracées (cf. 7.1.1.). En effet, dès le laboratoire le chercheur peut avoir une idée assez précise de l'extension spatiale de chaque entité thématique en positionnant sur la classification automatique de chaque zone pilote le tracé des segments. A partir de là et en fonction des critères retenus pour l'aire minimale d'observation, il peut pratiquement localiser les zones suffisamment vastes et homogènes à l'intérieur des segments où pourront être implantées les unités d'observation. Il sera ainsi possible de gagner un temps appréciable en limitant les tâtonnements inévitables lors du choix des sites d'observation sans une aide extérieure.

Nous n'avons évoqué jusqu'à présent que l'analyse qualitative de l'inventaire en regard de la précision de la localisation. Il convient d'en envisager l'aspect quantitatif et son comportement vis-à-vis de l'aire minimale.

6.4. APPORTS D'UN SONDAGE À DEUX DEGRÉS

A la section 5.2., une méthode de quantification des ressources ligneuses a été décrite. Elle procède par sondage aléatoire à plusieurs degrés. Nous nous en sommes inspiré pour proposer une quantification de la phytomasse herbacée. Il reste toutefois à la mettre en pratique car les événements d'avril 1989 nous ont empêché de le faire et, à notre connaissance, aucune équipe n'a encore pratiqué de la sorte en milieu naturel tropical.

Rappelons que ce type de quantification utilise des méthodes par régression, et que de ce fait il nécessite de nombreux points d'enquête. Comme nous allons le voir, seuls les sondages à plusieurs degrés permettent de concilier tous les impératifs de l'inventaire.

6.4.1. Lorsque quantifier devient nécessaire

Il est important de garder à l'esprit que, comme cela a été développé à la section 4.3., «*le sondage à deux degrés est un moyen terme entre un sondage à un seul degré, impraticable, et un sondage en grappe, imprécis.*»¹. Comme en théorie la méthode de sondage est indépendante de la thématique, le sondage à deux degrés s'adapte tout aussi bien à la quantification de paramètres démographiques qu'à la quantification de la phytomasse herbacée. En effet, il n'est pas possible de localiser avec précision les pixels isolés d'un tirage élémentaire (cf. 4.2.), ni de faire une quantification exhaustive de toute la grappe, c'est-à-dire couper toute la phytomasse herbacée aérienne de tous les segments d'enquête (la grappe échantillonnée).

Cette remarque s'applique aussi bien à une quantification en fin de cycle, que pour des quantifications successives au cours du cycle végétatif d'un pâturage. C'est le même principe en cas d'enquête destructive en milieu agricole, dès lors qu'il y a récolte intégrale avec coupe et pesée. Il est compréhensible que l'exploitant agricole ne veuille pas perdre tout ou partie de sa récolte, sans contrepartie. Le sondage à plusieurs degrés, par ses faibles prélèvements, trouve ici tout son intérêt. Nous retiendrons dorénavant, à la place du terme plusieurs degrés, celui de deux degrés qui caractérise cette enquête.

Comme nous avons pour principal souci, à précision équivalente, de réduire les coûts d'enquête, nous avons donc cherché à associer les spécificités de l'inventaire pastoral, comme la quantification de la biomasse, à l'enquête aréolaire développée pour l'inventaire d'occupation du sol. C'est en effet obtenir une meilleure rentabilité de l'enquête de terrain que de lui faire réaliser deux inventaires. Nous allons voir comment nous devons coupler ces deux objectifs de l'enquête sans que l'un ne pénalise l'autre.

Pour que la précision du sondage à deux degrés soit la plus forte possible, il faut, à coût constant, augmenter le nombre d'unités primaires échantillon, les segments, et réduire le nombre d'unités secondaires échantillon, les placettes de prélèvement quantitatif, par unités primaires échantillon². En effet, «... la précision des résultats ne dépend donc pas seulement du nombre d'unités secondaires échantillon mais plus encore du nombre d'unités primaires échantillon.»³. Cela est dû à la part de la variance intra-unités primaires dans la variance totale.

¹BARBARY 1988 p.34

²DESABIE 1966 p.103

³DESABIE 1966 p.264

O. Barbary¹ a constaté que la variabilité entre unités primaires, les segments, est responsable de 90 p.100 de la variance totale. De ce fait, il ajoute qu'il est préférable de n'enquêter qu'un faible nombre d'unités secondaires, mais que ce nombre doit être constant par unité primaire.

En effet, J. Desabie² conseille, toujours à coût constant, de tirer le même nombre d'unités secondaires par unité primaire. Pour pouvoir déterminer une variance pour chaque degré du tirage il est indispensable de disposer d'au moins deux observations à chaque niveau³, soit au moins deux unités secondaires échantillon par unité primaire échantillon.

Nous avons donc retenu, par segment, deux groupes de placeaux de prélèvement tirés systématiquement suivant la même méthode que le tirage des segments eux-mêmes. Nous devons donc tirer les coordonnées du coin NW du premier groupe de placeaux, puis déterminer son symétrique par rapport au centre du segment. Le principe est le même que celui décrit à la figure 6.4. Ensuite, cette configuration se trouvait répétée à l'ensemble des segments.

Ces deux unités secondaires par unité primaire devaient constituer un total de 40 groupes de placeaux de coupe par zone d'étude. Si l'on reprend comme base de référence les dimensions de ces groupes de placeaux utilisés lors de l'enquête support⁴, soit 3 600 m² chacun, on arrive à un total de 144 000 m² ou 14,4 ha, c'est-à-dire un taux de sondage de 0,04 p.100 par rapport à l'ensemble de la zone d'étude.

A raison de deux unités secondaires, destinées à la quantification, par segment, l'évaluation de la production fourragère est assurée de manière représentative. Dans notre cas, 40 unités de quantification auraient été enquêtées. Les régressions effectuées entre les quantités de phytomasse herbacée aérienne et les indices de végétation (cf. 5.2.3.) auraient eu en théorie un nombre de points suffisants pour être satisfaisantes.

En phase opérationnelle, sur des secteurs plus grands que nos zones tests, le nombre des groupes de quantification doit même être suffisant pour constituer deux groupes. L'un initie les traitements et l'autre sert aux contrôles. Les résultats seront d'autant plus précis que l'on aura pris soin de quantifier la biomasse dans toutes les catégories d'occupation du sol "utiles", c'est-à-dire : même celles qui n'ont pas de végétation, pour avoir la réflectance terrain des différentes couleurs de sols nus.

¹BARBARY 1988 p.277

²DESABIE 1966 p.267

³DESABIE 1966 p.356

⁴DE WISPELAERE 1989 p.86

Conscient de la faible probabilité de tomber directement à l'intérieur d'une aire homogène, lors du tirage au second degré, il était convenu que le groupe de placeaux de coupe serait implanté dans l'aire homogène la plus proche et donc couplé à un relevé qualitatif (structure générale des formations végétales, cortège floristique, etc.). On voit donc que conjointement à une procédure par tirage systématique se développe un échantillonnage par choix raisonné ou semi-raisonné.

Cet aspect de la procédure d'enquête au niveau du terrain renvoie à celui du déplacement théorique évoqué au paragraphe 6.1.2., à savoir, des transects parallèles régulièrement espacés pour se déplacer et enquêter à l'intérieur du segment. Ils sont dits théoriques car il n'est pas toujours aisé ni utile de procéder de la sorte, mais il est quand même préférable d'être systématique, pour ne pas oublier une partie du segment, voire la visiter deux fois.

En pratique, nous avons essayé, suivant la topographie ou la densité de la végétation, de suivre des transects alignés N-S ou W-E, partant du coin NW, et espacés de 100 à 200 m. Moyennant quoi, cette vision globale du segment permet en général d'enquêter plusieurs aires homogènes préalablement repérées sur les classifications automatiques (cf. 7.1.).

Le fait de présélectionner en laboratoire les aires minimales homogènes, comme nous l'avons précédemment expliqué, ne change rien à la démarche. Il n'est pas possible d'aller uniquement sur les aires sus-mentionnées. Il faut de toute façon contrôler d'éventuelles modifications du paysage que l'imagerie satellitaire n'avait pas encore prises en compte à la date de prise de vue. Il s'agit essentiellement des cultures, de l'évolution de la dégradation du milieu, mais aussi de la reconquête par la végétation de certains secteurs précédemment dégradés.

L'espacement entre les transects est déterminé par la visibilité et l'hétérogénéité du paysage. En règle générale, le trajet sur le terrain passe toujours sur ou à proximité d'une aire minimale d'observation. Le sondage à deux degrés initialement retenu s'accommodé très bien de ce type de cheminement.

6.4.2. Du théorique au possible

En termes de temps et de coût d'enquête, la taille de la zone d'étude peut rapidement devenir un facteur de blocage. En effet, si l'on reprend les données développées au paragraphe 5.2.2., associées à certains des paramètres relevés sur le terrain, on constate d'une part, que le nombre d'heures d'enquête par segment est élevé, et que d'autre part, le nombre de jours d'enquête au niveau de la zone d'étude risque d'être injustifiable aux yeux des bailleurs de fond.

Pour réaliser l'inventaire d'un segment qui comporte un intérêt pastoral, il faut en moyenne une demi-heure pour décrire assez succinctement trois à quatre parcelles (cf. 7.3.). Ces chiffres ont été obtenus en saison sèche sur un couvert herbacé déjà très dégradé par la fréquentation animale. L'inventaire floristique y est de ce fait assez rapide. Il semble donc judicieux de doubler ce temps d'investigation en fin de saison des pluies pour conserver une marge de sécurité.

Cette heure d'enquête comprend, pour trois ou quatre parcelles, une description générale (topographie, couleur du sol, pourcentage de sols nus, fréquentation animale, etc.) et une partie plus particulièrement pastorale (structure de la végétation, recouvrement ligneux, cortège floristique, etc.). A cela, il faut ajouter le temps de quantification de la biomasse sur deux unités secondaires. Pour chacun des deux sites, il faut compter 2 h 30 mn de quantification par récolte intégrale (cf. 5.2.2.). En l'absence d'un quelconque gain de temps dans la procédure de collecte au niveau du segment, **il est raisonnable de tabler sur une durée d'inventaire de six heures par segment en zone pastorale et lorsque la végétation peut se prêter aux mesures susmentionnées.**

Nous n'avons pas pu déterminer le temps nécessaire à ce type d'enquête en milieu agricole tropical. Dans la mesure où il n'est pas nécessaire de réaliser de mesure quantitative, le temps d'enquête est peut-être plus restreint, tout dépend du nombre de parcelles. Pour mémoire, le temps d'inventaire est d'une heure trente en moyenne en milieu agricole tempéré¹, sur du grand parcellaire il est vrai.

A raison de six heures d'inventaire par segment, il n'est possible d'enquêter qu'un segment par jour. De ce fait, en fin de saison des pluies, avec le protocole décrit précédemment, par zone d'étude comprenant 20 segments (taux de sondage de 1,7 p.100), il aurait fallu 20 jours de terrain pour n'enquêter que 40 000 ha. On notera que le temps de liaison entre segments est minime en regard du temps passé sur le segment. Il faut en moyenne rajouter une demi-heure de liaison entre les segments (cf. 7.3.).

Est-ce que ce temps d'enquête est compatible avec la durée de la mission ?

Rappelons qu'une association pastorale couvre en moyenne 300 000 ha, l'équivalent d'un carré d'environ 55 km de côté, c'est-à-dire pratiquement la couverture d'une image SPOT. Pour de telles superficies, il n'est plus nécessaire de sonder avec un taux de 1,7 p.100, 1 p.100 est largement suffisant. Cependant, 1 p.100 de 300 000 ha représente environ 84 segments de 36 ha, soit 84 jours d'enquête et 168 quantifications de biomasse !

¹FOURNIER 1986 p.24

L'inventaire d'occupation du sol en milieu pastoral requiert impérativement une réduction du temps passé sur le segment et du nombre de segments, tout en restant représentatif. Sinon, ce type d'inventaire continuera d'être pratiqué de manière subjective et non représentative.

Il est à notre sens impératif de descendre en dessous de la barre des 30 jours de mission pour 300 000 ha et pour une seule équipe, si l'on souhaite rester crédible auprès des organismes bailleurs de fonds. Le pastoralisme n'étant pas un créneau aussi porteur que l'agriculture, il est difficile d'envisager, d'un point de vue financier, la présence de plusieurs équipes de terrain sur ce thème. Nous n'utiliserons donc pas cette hypothèse.

Réduire le temps d'enquête revient à agir sur la durée des prélèvements et leur nombre. Au paragraphe 5.2.3., il a été envisagé de réduire le temps nécessaire à la quantification en ayant recours soit à l'utilisation d'un radiomètre de terrain soit aux méthodes par double échantillonnage. Nous ne sommes pas en mesure de déterminer le gain de temps de cette dernière méthode car nous ne l'avons pas nous-même pratiquée. Il semble toutefois que l'on puisse l'utiliser d'une part, sur les aires homogènes d'observation où il n'y a pas de quantification et d'autre part, lorsque les conditions sont contraires à un usage satisfaisant du radiomètre (nébulosité, avant 10 h ou après 14 h, etc., cf. 5.2.3.).

Nous avons évalué le gain de temps théorique possible avec le seul radiomètre et bien sûr l'utilisation de l'imagerie satellitaire. Pour un site de quantification de 25 à 36 placeaux, par récolte intégrale, il faut compter environ 2 h 30 mn (cf. 5.2.2.). Par estimation au radiomètre terrain, pour 30 placeaux il faut 15 mn d'après les travaux de M. Grouzis¹. Notre répartition des placeaux étant différente, nous avons compté 15 mn supplémentaires de temps de préparation et de marge de sécurité, soit 30 mn.

Donc, en dehors des sites d'étalonnage où l'on effectue coupes intégrales et radiométries, il est possible de faire passer la phase de quantification de 2 h 30 mn à 30 mn, soit un gain de temps de 80 p.100. Il faut considérer qu'environ cinq à sept sites seront utilisés pour l'étalonnage et conserveront donc un temps d'enquête de trois heures. M. Grouzis différencie six groupement végétaux², G. De Wispelaere *et alii* en 1987 en différencient cinq³ et en 1988, sept⁴.

¹GROUZIS 1988 p.79

²GROUZIS 1988 p.63

³DE WISPELAERE 1987 p.19

⁴DE WISPELAERE 1988 p.10

Au niveau du segment, le temps d'inventaire est maintenant ramené à trois heures. Ce temps comprend : le cheminement puis l'observation des parcelles qui ne comportent pas de quantification (une heure), ainsi que la description de deux aires homogènes d'observation comportant chacune un site de quantification (au radiomètre) d'une trentaine de placeaux (deux fois une heure).

Lorsqu'un segment ne comporte pas de sites d'étalonnage et que l'on quantifie au radiomètre, il faut considérer ce temps d'inventaire de trois heures comme un maximum. En effet un nombre important de segments ne portent pas suffisamment de végétation pour "mériter" trois heures d'inventaire. De plus, il est difficile d'envisager plusieurs journées consécutives de neuf heures de travail effectif (3 * 3 hrs). Lorsque la végétation et le paysage imposent trois heures de travail par segment, seuls deux segments sont inventoriés par jour. La compensation se fera avec des secteurs à végétation moins dense. On peut dès lors considérer qu'il est envisageable d'inventorier une moyenne de trois segments par jour.

Nous avons vu qu'inventorier une zone d'étude de 300 000 ha avec un taux de 1 p.100 revenait à enquêter 84 segments de 36 ha. A raison de trois segments par jour, sans contretemps, il suffit de 28 jours. La barre des trente jours est donc franchie dès lors que les mesures quantitatives sont effectuées non plus uniquement par coupes intégrales mais par radiométrie et double échantillonnage, et que le travail est accompli "à marche forcée".

Dans la mesure où il est admis qu'un nombre légèrement inférieur de segments peut encore apporter une précision satisfaisante, il est préférable de diminuer la charge de travail et assurer une marge de sécurité indispensable dans ce type de milieu.

Si l'on conserve 60 segments sur les 84 précédemment sélectionnés, soit un taux de 0,72 p.100 pour 300 000 ha et des segments de 36 ha, les unités d'enquête sont encore suffisamment nombreuses pour que l'on puisse séparer l'échantillon en segments d'initialisation et segments de contrôle et conserver une marge de sécurité de 10 jours sur les trente de départ.

Il en va de même pour la quantification qui dispose encore de 120 sites de mesures. On prendra toutefois soin de vérifier sur la classification automatique et avant la mission, que chaque thème est largement représenté. Cela dans le but de pallier l'inconnue "groupement végétal". En effet, en laboratoire avant le départ, il n'est pas possible d'apprécier le paramètre groupement végétal à l'intérieur des classes de la classification automatique. Il y a donc une inconnue sur la représentativité de l'échantillon vis-à-vis des groupements végétaux appréhendés par le biais des "pré-classes" d'occupation du sol.

Il est préférable de ne pas réduire le taux de sondage des sites de quantification en ramenant leur nombre de deux à un par segment. Il ne serait plus alors possible de déterminer la variabilité de chaque unité primaire¹. Il est plus intéressant, soit de supprimer les segments secondaires tirés par symétrie (cf. fig. 6.4), soit d'annuler au hasard une des quatre répétitions a, b, c ou d (cf. 6.2.1.). Cette dernière solution, la plus probable sur de grandes zones d'étude, fait perdre environ 25 p.100 des segments par répétition supprimée. Elle est donc très efficace dans le cas présent et agit aussi bien sur l'aspect quantitatif que qualitatif de l'inventaire.

En conclusion, le choix du nombre de sites de quantification, et donc de segments, est établi de manière pragmatique. Sur de grandes superficies, pour des paysages ne comportant pas une trop grande variété de classes d'occupation du sol (cf. 7.3.), il semble que l'on puisse réduire le taux de sondage à moins de 1 p.100, probablement entre 0,5 et 1 p.100.

On prendra soin de garder un nombre de segments qui permettent de constituer deux sous-échantillons, l'un pour les traitements l'autre pour les contrôles. Moyennant quoi, même s'il n'est pas possible de calculer une variance a priori² et donc d'estimer la précision future de l'enquête, on est encore assuré d'une assez bonne représentativité pour un temps d'enquête restreint. Notons que plus le taux de sondage diminue, à taille de segment constante, plus le temps de liaison inter-segment augmente.

Pour conclure ce troisième chapitre, il apparaît important de rappeler que le passage d'un sondage "théorique", destiné à des paysages de milieux tempérés où l'agriculture joue un grand rôle, à un sondage "pratique" en milieu naturel tropical nécessite de nombreuses adaptations. Nous avons démontré qu'il était possible de rester rigoureux malgré l'introduction d'un certain pragmatisme dans le choix des paramètres.

Jusqu'à présent, l'impossibilité de se localiser précisément donnait un argument de choix à tous les adeptes des méthodes d'enquête par choix raisonné pour rejeter les inventaires réalisés sur la base d'un échantillonnage aléatoire. Cet argument est en passe de devenir caduc en raison de la généralisation des localisateurs par satellites.

¹DESABIE 1966 : 355-356

²FOURNIER 1986 p.13

L'amélioration de la précision de localisation permet donc de s'éloigner des pistes pour implanter les sites d'observations. Cependant, pour affecter en toute rigueur un relevé de terrain à son équivalent sur le document satellitaire, l'expérience confirme que l'on ne doit pas enquêter un pixel isolé mais un groupe de pixels situé dans une aire homogène minimale. Cette aire d'observation minimale pourra être relative ou absolue et sera plus ou moins étendue en fonction de la qualité attendue.

L'appréciation de l'aire minimale absolue est non seulement tributaire de la précision du localisateur mais aussi de la mise en géométrie du support d'enquête, l'image satellite. De plus ce document devra être dans le même référentiel que le localisateur par satellite, etc.

Ces contraintes sont peu sensibles dans les enquêtes en milieu agricole tempéré. En effet, on s'y déplace aisément de proche en proche sur des parcelles facilement individualisables et localisables sur le document d'enquête. A tel point qu'il n'est pas forcément nécessaire de le mettre en géométrie. Cependant, ces aspects sont souvent primordiaux en milieu naturel tropical où il est très souvent peu fiable et peu précis de se déplacer à vue et donc de se contenter de l'aire minimale relative. L'apport du localisateur satellitaire est ici plus net.

On retiendra donc que si le choix de l'aire minimale absolue est celui qu'il faut favoriser en raison de sa rigueur, on est parfois contraint de se contenter de l'aire minimale relative. Ce pis-aller permet de réaliser l'inventaire mais n'assure pas une qualité de localisation satisfaisante pour bon nombre de parcelles d'observations. Ceci s'applique aussi aux échantillonnage non aléatoire.

Tout au long de cette partie, nous avons passé en revue les différentes méthodes d'enquête, qu'elles soient généralistes, comme celles relevant de la théorie des sondages, ou qu'elles soient spécifiques à l'étude de certains milieux, comme celles développées pour les inventaires pastoraux. Le but est de proposer une approche qui permette en zone aride ou semi-aride de fournir un descriptif de l'environnement qui soit aussi représentatif et fiable que possible.

En fonction des contraintes du milieu, et de notre problématique, les enquêtes aréolaires associées à la télédétection nous ont paru être les plus conformes à notre attente. Développées pour les milieux agricoles tempérés, il a toutefois été nécessaire de les adapter aux milieux naturels tropicaux. Il est dorénavant possible, grâce à elles, d'effectuer des propositions d'aménagement à partir d'une connaissance du milieu dont on a pu vérifier la fiabilité et la représentativité. Cette connaissance était auparavant difficile à acquérir avec des équipes légères et donc à moindre coût. Les marges désertiques jusqu'à présent mal connues ont maintenant un outil

d'analyse peu onéreux et simple d'emploi destiné à être mis en pratique par des nationaux.

Cette méthode, dont nous allons juger les résultats en troisième partie, est un outil d'analyse géographique aux travers de l'inventaire d'occupation du sol. Ces performances sont adaptées aux caractéristiques des milieux arides et semi-arides. Le Sahel sud-mauritanien, sur lequel cet outil a été testé, en offre un parfait exemple d'application.



Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire
des Pays tropicaux
Département du CIRAD
10, rue Pierre Curie
94704 MAISONS ALFORT Cedex
(France)

T-1413

T.R.B

CNRS-UNIVERSITÉ DE TOURS
M.S.H. "VILLES ET TERRITOIRES"
UMS 1835
BP 60449
33, allée Ferdinand de Lesseps
37204 TOURS Cedex 03

**Utilisation conjointe
de la télédétection
et de l'enquête de terrain
lors des inventaires
d'occupation du sol.**



**Recherche
méthodologique
appliquée au Sahel
sud-mauritanien.**

Vincent GODARD

Thèse de doctorat en géographie
de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales
— E.H.E.S.S. —

Soutenue publiquement le ²⁰ Décembre 1991

en présence de : — M. BARBUT
— E. BERNUS
— G. DE WISPELAERE
— M. HOTYAT
— G. ROUGERIE

MSH-TOURS



D 355 004314 4



Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire
des Pays tropicaux
Département du CIRAD
10, rue Pierre Curie
94704 MAISONS ALFORT Cedex
(France)

T-1413
P.R.B. ^{1/2}

URBAMA
bibliothèque
CNRS UNIVERSITE de TOURS

**Utilisation conjointe
de la télédétection
et de l'enquête de terrain
lors des inventaires
d'occupation du sol.**



**Recherche
méthodologique
appliquée au Sahel
sud-mauritanien.**

Vincent GODARD

Thèse de doctorat en géographie
de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales
— E.H.E.S.S. —

Soutenue publiquement le ²⁰ Décembre 1991

en présence de : — M. BARBUT
— E. BERNUS
— G. DE WISPELAERE
— M. HOTYAT
— G. ROUGERIE

TROISIÈME PARTIE

Applications

La troisième et dernière partie de ce mémoire est consacrée aux principaux résultats obtenus lors de l'inventaire proprement dit ainsi que pendant les recherches développées pour rendre opérationnelle en milieu naturel tropical la méthode proposée. Ces résultats sont présentés par ordre chronologique comme s'ils avaient été acquis au cours d'un inventaire "de routine".

Rappelons que pour des raisons de calendrier, l'inventaire a eu lieu avant qu'il ne soit possible de mettre au point tous les aspects méthodologiques de la procédure d'enquête. Ainsi, les orientations et résultats proposés aux sections 7.1. et 7.2. ont été acquis postérieurement à la phase d'inventaire. Cependant, comme ils concernent la préparation de l'enquête de terrain (élaboration de la stratification et évaluation de la taille du parcellaire), il nous a paru logique de les replacer dans un contexte chronologique, c'est-à-dire avant le dépouillement et les résultats.

De ce fait, et pour ce travail, les résultats du dépouillement des relevés de terrain (cf. 7.3.) et les résultats cartographiques (cf. 8.) et statistiques (cf. 9.) de l'inventaire d'occupation du sol sont indépendants des phases préparatoires à savoir la stratification (cf. 7.1.) et l'évaluation de la taille du parcellaire (cf. 7.2.). En mode opérationnel et pour un gain de précision maximal, ces étapes doivent s'enchaîner selon une séquence chronologique proche de celle présentée.

En raison d'une procédure d'enquête terrain en milieu oasien trop différente de celle des domaines agropastoraux de Rosso et Lekseïba, les résultats cartographiques et statistiques de ce domaine ne sont pas présentés ici. Ils sont toutefois accessibles sous une forme condensée dans les actes du colloque sur l'agronomie oasienne qui s'est tenu en 1988 à Tozeur¹, ou sous une forme plus développée dans le rapport d'inventaire². Seuls sont présentés les résultats concernant la stratification et l'analyse du parcellaire, car l'approche méthodologique est pratiquement identique en milieu oasien et agropastoral.

¹GODARD 1990

²DE WISPELAERE 1989

7. LES PRÉPARATIFS ET LE DÉPOUILLEMENT DE L'ENQUÊTE

Plusieurs étapes de l'inventaire ont été regroupées dans ce chapitre. Il s'agit des stratifications, qu'elles soient préparatoires (a priori) ou de traitement (a posteriori). L'analyse de la taille du parcellaire trouve tout naturellement sa place ici dans la mesure où elle précède la phase de terrain. Bien que postérieur à la mission, le dépouillement de l'enquête conclura ce chapitre et permettra d'accéder aux résultats cartographiques. L'enquête de terrain proprement dite n'est pas reprise ici dans la mesure où elle est décrite à la section 5.2..

7.1. LA STRATIFICATION

Comme cela a déjà été décrit au paragraphe 4.3.1., la stratification peut se dérouler avant ou après la phase d'enquête. Ces deux stratifications n'ont pas le même but. Avant, elle permet une prise de contact radiométrique du terrain pour mettre en place l'échantillonnage. Après, elle permet de redresser un échantillonnage perfectible. Bien qu'elles ne soient pas chronologiquement associées, nous avons préféré regrouper ces étapes pour simplifier la compréhension de ce travail.

Les stratifications dont il est fait état ici, sauf mention contraire, sont des stratifications de type morphologique (cf. 4.3.1.1.) ; elles renvoient à une notion de zones homogènes par rapport à une typologie plus ou moins définitive. Elles s'appuient donc sur des critères d'homogénéité radiométrique et texturaux, puis par extension d'homogénéité thématique.

7.1.1. Stratification préalable

Bien qu'aucune connaissance précise du terrain ne soit requise pour mettre au point la procédure d'inventaire, une analyse en laboratoire des documents disponibles doit permettre d'adapter le plan d'échantillonnage aux zones d'étude (cf. 6.1.). Pour déterminer la taille optimale des segments d'enquête, il est préférable de connaître, même approximativement, le nombre et la proportion des thèmes présents sur la zone d'étude. De même, une zonation par secteur homogène, la stratification morphologique, permet de "récupérer" un inventaire comportant des segments qui n'ont pu être enquêtés (cf. 6.1.3.). C'est principalement de la procédure de stratification dont il va être question ici.

Comment procéder ?

Classiquement, on utilise une enquête ou une documentation déjà existante, très souvent de type cartographique (cartes géologiques, morpho-pédologiques, etc.), à partir de laquelle sont délimitées des zones supposées homogènes par rapport à la variable étudiée (cf. 4.3.). Parfois par choix mais aussi lorsque la documentation fait défaut, cette zonation est effectuée sur photographie aérienne ou sur imagerie satellitaire. Une photointerprétation succincte est réalisée sur documents analogiques ou numériques. Cependant, cette zonation "manuelle" est longue et relativement subjective.

Dans la mesure où nous disposons de documents satellitaires numériques, il nous a semblé plus rapide et plus fiable de laisser la "machine" se charger des étapes de stratification sur le même principe que pour les classifications automatiques. En effet, les limites fournies par les algorithmes utilisés (cf. *infra*) sont basées sur les distances radiométriques, c'est-à-dire, l'équivalent des contrastes perçus par l'œil et qui permettent le tracer des limites entre formations. Les limites automatiques ne sont pas forcément plus exactes que les limites visuelles, mais elles sont obtenues plus rapidement et sont plus précises.

En revanche, l'automatisation fait perdre le pouvoir intégrateur de l'œil, pouvoir qui permet de réduire le nombre des limites au strict nécessaire. Un travail de nettoyage, qui peut se révéler important, est à faire après une stratification automatique.

La procédure de stratification automatique se déroule comme suit. Nous allons en décrire les étapes les plus marquantes.

7.1.1.1. *Sélection des canaux*

Dans la mesure où nous ne disposons pas d'un très gros centre de calcul et que cette méthodologie doit pouvoir être transférée vers des utilisateurs dotés de petits moyens de calcul, les traitements sont réalisés sur des fichiers peu nombreux et de petite taille. Pour cela, nous avons à chaque fois sélectionné les canaux les plus décorrélés deux à deux (cf. Annexe 2), à savoir les deux premières composantes, ou axes factoriels, de l'Analyse en Composante Principale (ACP).

Rappelons que l'ACP est une combinaison linéaire des canaux origines dont une des caractéristiques est de fournir des néo-canaux hiérarchisés et linéairement décorrélés. Cela signifie que l'essentiel de l'information est alors concentrée dans les premières composantes, qui sont suffisantes, en théorie, pour mener à bien les traitements. La première permet l'analyse de la structure du paysage, tandis que la deuxième rehausse les phénomènes linéaires.

Dans le cas de SPOT, cette information est rassemblée dans la première composante (F1), voire la deuxième (F2). A titre d'exemple pour Rosso, pratiquement 74 p.100 de l'information est contenue dans la première composante, 22 p.100 dans la deuxième et seulement 4 p.100 dans la troisième (cf. les Valeurs propres du tab. 7.1). Cette troisième composante (F3) renferme en général des "bruits" d'enregistrement (phénomènes de lignages, etc.) et présente un aspect très pointilliste. Elle n'a donc pas été utilisée pour les traitements présentés ici.

Les premières composantes de Lekseïba et des oasis contiennent respectivement 78 et pratiquement 89 p.100 de l'information contenue dans chacun des fichiers. C'est donc sur les premières et deuxièmes composantes qu'il est intéressant de réaliser les classifications. Cependant, une information radiométrique dont on a changé le système d'axes de projection, étalé la dynamique, etc. devient plus complexe à interpréter et, même lorsque l'on a recours à des aides à l'interprétation comme les graphes bidimensionnels (cf. 8.1.), il est compliqué d'y localiser les différentes catégories d'occupation du sol. C. Malek¹ écrit d'ailleurs que «... le graphe visualisé sur un espace à deux dimensions est une image déformée de la réalité, les points étant des projections de l'espace à n dimensions.». Il est donc souvent indispensable de remonter aux canaux bruts pour interpréter chaque composante.

La visualisation des axes factoriels indique que la première composante oppose les milieux à forte activité végétale plus ou moins humides (faibles valeurs spectrales) aux milieux fortement réfléchissants (fortes valeurs). La contribution des canaux XS3 et XS2 est particulièrement forte pour la première composante (cf. les Vecteurs propres du tab. 7.1). On notera d'ailleurs que cette première composante est fortement et positivement corrélée avec l'indice de brillance, 0,98 en moyenne (cf. Annexe 2).

Dans le cas de Lekseïba, la deuxième composante oppose nettement les zones à végétation active (faibles valeurs) aux zones inondées (fortes valeurs), la contribution majoritaire vient du canal XS3 et elle est négative (- 0,73). La corrélation la plus marquée est obtenue avec l'indice de végétation, elle est négative et assez forte - 0,69 (cf. Annexe 2).

C'est un peu plus complexe pour les deux autres secteurs d'étude où les zones sèches sableuses viennent s'associer aux zones à végétation active pour s'opposer aux milieux humides ou décapés et réfléchissants, essentiellement des zones de dépôts limono-argileux. Pour ceux-ci le canal XS1 apporte la contribution la plus importante, 0,77 à Rosso et 0,86 pour les oasis. C'est d'ailleurs logiquement le

¹MALEK 1989 p.81

canal XS1 qui est le plus fortement corrélé avec cette composante pour Rosso et les oasis, respectivement 81 et 64 p. 100 (cf. Annexe 2).

tableau 7.1 - Paramètres des axes factoriels

CP	Rosso			Lekseiba			Oasis		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
	Valeurs propres								
	240,3	72,7	13,7	244,1	63,8	4,8	104,3	10,6	2,7
en %	73,6	22,2	4,22	78,1	20,4	1,5	88,7	9,0	2,3
	Vecteurs propres								
Cx									
XS3	0,66	- 0,59	- 0,47	0,68	- 0,73	0,05	0,64	- 0,50	0,58
XS2	0,69	0,22	0,69	0,61	0,53	- 0,59	0,70	0,07	- 0,71
XS1	0,30	0,77	- 0,56	0,41	0,43	0,81	0,32	0,86	0,39

CP : composantes principales

Cx : canaux bruts

7.1.1.2. Classifications automatiques

Le premier problème auquel nous avons été confronté pour réaliser les classifications non supervisées est l'absence de ce type de programme sur notre système de traitement de type Péricolor 2001 (!). Rappelons que l'intérêt des classifications non supervisées est d'être réalisables sans la moindre information de terrain (cf. 4.3.2.). C'est donc les seules qui permettent de préparer la mission de terrain (cf. 6.3.2.).

Pour contourner cette lacune, ces classifications ont été réalisées sur le calculateur hôte, un Data General MV 15 000, au prix de quelques contorsions. Celles-ci tiennent essentiellement au volume des fichiers sur lesquels les traitements sont effectués. La mémoire vive du calculateur hôte et le logiciel statistique utilisé, *Statistical Analysis System* (SAS), ne sont pas réellement conçus pour traiter de très gros fichiers. Dans l'état actuel de nos programmes, il ne nous paraît guère possible de dépasser des matrices de 1 024 * 1 024 pixels, soit un peu plus d'un méga-octet.

Ceci n'est pas une limitation trop contraignante dans la mesure où il est tout à fait possible de travailler sur des fichiers échantillonnés. A titre d'exemple une scène entière SPOT d'un peu plus de 3 000 * 3 000 pixels sera échantillonnée à raison d'un pixel sur trois, sans que les paramètres images (moyenne, variance) n'évoluent significativement, et pourra être traitée par la méthode que nous allons décrire car, pour chaque canal, le fichier résultant ne dépasse pas un méga-octet.

Le but de cette recherche est de trouver une partition de l'espace qui réponde à deux problématiques. D'une part cette partition doit permettre une stratification automatique de la zone pilote et d'autre part elle doit renseigner le chercheur sur le nombre de thèmes potentiellement contenus dans cet espace. La qualité de la partition est appréciée par sa stabilité radiométrique.

Nous avons vu au paragraphe 4.3.1.1. qu'en théorie, plus le nombre de strates est élevé plus le résultat est précis. Dans la pratique, on constate que plus celui-ci augmente plus le rendement diminue et qu'au-delà de 15 strates le rendement est semble-t-il très décroissant¹. Pour sa part, H. Andrianasolo² estime que le gain de précision est surtout sensible entre six et huit strates. En dehors du fait que l'accroissement du nombre de strates entraîne une augmentation du nombre de points d'enquête, nous avons voulu savoir quelle était la classification la plus stable et quel était le nombre optimal de strates par zone pilote.

Le nombre maximal de partitions qui peut être extrait d'un échantillon est obtenu par la formule de Brooks-Carruthers³ :

$$K_{\max} < 5 \log_{10} n$$

celle-ci détermine en fonction du logarithme décimal de n (effectif de l'échantillon) le nombre maximal de classes K_{\max} qu'il est théoriquement possible de constituer.

On sait par ailleurs qu'il est difficile d'identifier de manière fiable et représentative plus de 20 classes en milieu naturel lorsque la végétation spontanée est quasi exclusive dans le paysage. Rappelons qu'il est nécessaire d'inventorier chaque catégorie au moins trois fois pour déterminer la précision de son estimation⁴ (cf. 9.1.1.). De ce fait, il est illusoire de chercher une diversité thématique très élevée, au-delà de 20 classes, car les contraintes de terrain imposeront des regroupements. Donc pour 20 catégories d'occupation du sol, cette formule empirique⁵ requiert par zone pilote et pour chaque variable, ici les deux axes factoriels, un échantillon de 10 000 pixels.

Un programme Fortran se charge d'effectuer le sondage par tirage aléatoire sans remise. Le taux de sondage est de l'ordre de 1 p.100. Le fichier de 10 000 individus et deux variables (F1 et F2 les deux premières composantes) ainsi constitué est ensuite traité sous le logiciel SAS. En raison de sa taille, la seule

¹BRION 1982 p.23

²ANDRIANASOLO 1988 p.158

³CHADULE 1986 p.31

⁴DESABIE 1966 p.218

⁵DEROO 1980 p.259

procédure de classification par agrégations successives de type nuées dynamiques que nous ayons pu utiliser est Fastclus¹.

La classification se fait en trois étapes. La première consiste à éliminer les classes dont l'effectif est trop faible et donc peu représentatives. Pour cela, on fait tourner une première fois le programme pour un nombre de classes plus élevé que celui préconisé par la formule de Brooks-Carruthers, en général 30 classes. Cela permet de repérer les groupes radiométriquement stables mais constitués d'un nombre d'individus trop faible, les *outliers*. En effet, la procédure Fastclus est très sensible aux outliers. On les élimine en imposant à l'algorithme de travailler avec des groupes dont la fréquence est supérieure à 0,5 p.100 de l'effectif de l'échantillon. En moyenne, cinq à dix groupes sur les trente sont éliminés. Les groupes restants vont constituer les noyaux stables dont les paramètres vont servir à étalonner les nuées de départ des classifications de la deuxième étape.

Lors de la deuxième étape, toutes les partitions comprises entre K_{\max} classes et la partition minimum vont être testées, soit 19 partitions comprises entre 20 classes et deux classes. On va rechercher quelle est celle qui offre la variance inter-strates la plus forte pour la variance intra-strates la plus faible. Pour cela, on utilise la procédure SAS Candisc², qui est du type analyse discriminante canonique (distance de Mahalanobis). Elle fournit d'une part la variance totale pour les deux variables étudiées mais aussi, et c'est le plus important, les variances inter et intra-classes pour les 19 partitions.

Précisons que pour déterminer la partition la plus stable, nous avons surtout étudié la variance de la première composante (F1) de chaque zone pilote, car celle-ci contient toujours l'essentiel de l'information radiométrique ; sa valeur propre est comprise entre 70 et 90 p.100 (cf. tab. 7.1).

D'une manière générale, moins il y a de classes dans une partition plus la variance inter-strates diminue et plus la variance intra-strates augmente (cf. Annexe 5). Parfois cette évolution s'estompe ou se renverse. On peut dès lors considérer que la partition où l'on constate ce renversement de tendance est plus stable radiométriquement que la précédente et la suivante. Pour matérialiser ce phénomène, nous avons porté sur la figure 7.1, uniquement pour la première composante, l'évolution de la différence entre deux écarts types successifs.

Notons que la procédure Candisc fournit les variances inter et intra-classes sous forme d'écarts-types. Dans la mesure où ceci ne complique pas la

¹SAS 1989 : 823-850

²SAS 1989 : 387-404

compréhension de la démonstration, nous les avons conservés tels quels dans nos calculs.

La figure 7.1 permet de constater que l'augmentation de la variance intra-classes et la diminution de la variance inter-classes sont marquées lorsque le nombre de classes diminue. Ceci est encore plus net pour une partition en deux classes, mais nous n'avons pu le représenter en raison de contraintes d'échelle. Les partitions à forte stabilité apparaissent sur le graphique lorsque les courbes d'évolution des variances inter et intra au lieu de diverger convergent ou se recourent.

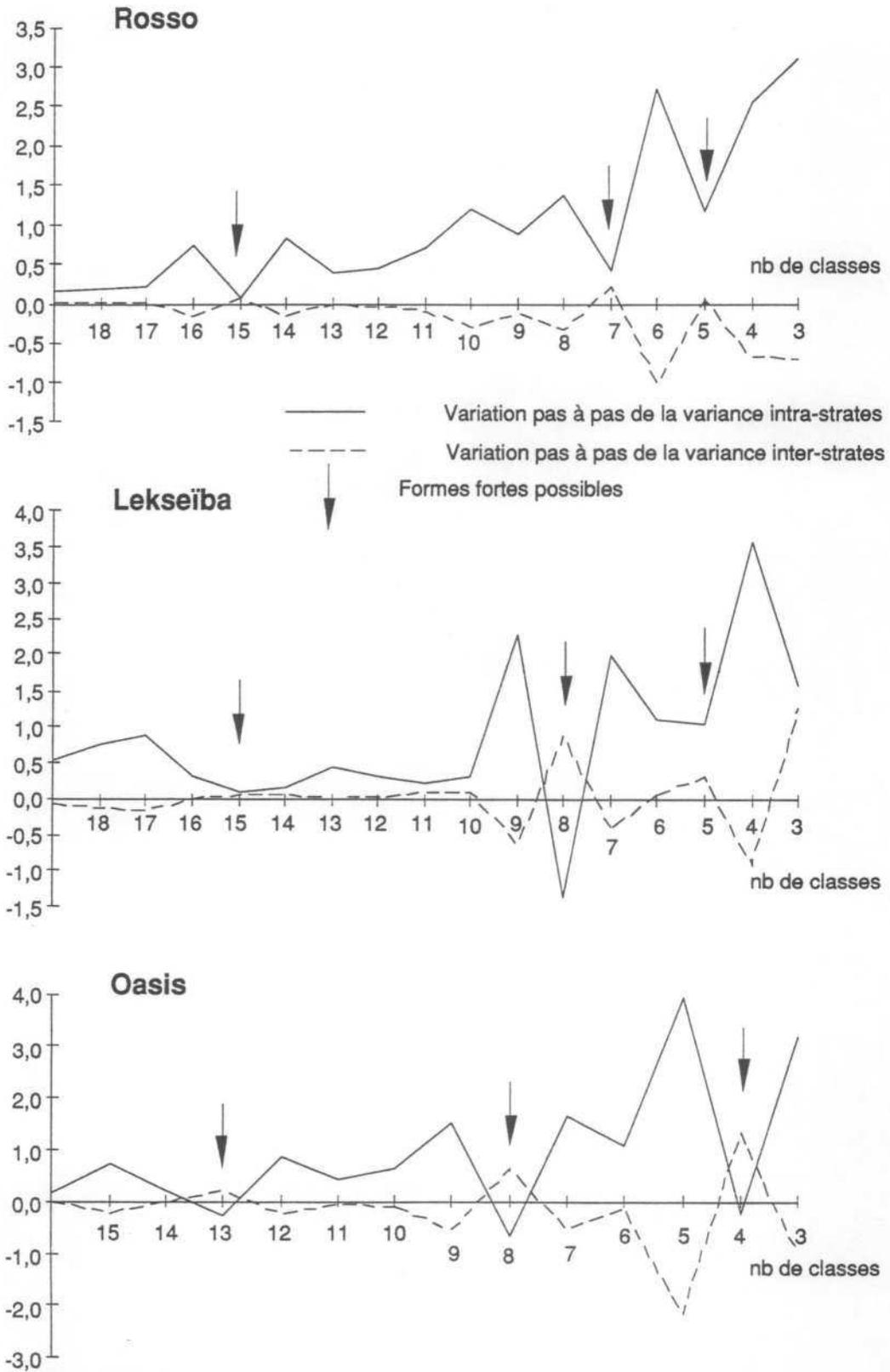
Dans le cas de Rosso, il y a trois partitions stables, une à trois classes, une à cinq et une à quinze. C'est cette dernière qui est la plus marquée mais aussi la plus intéressante en raison de la diversité qu'elle offre vis-à-vis du nombre de thèmes potentiels dans la zone pilote. Pour les mêmes raisons, nous avons retenu à Lekseïba la partition en quinze classes et non celle en huit pourtant plus marquée. Enfin, la zone des oasis qui en raison de sa plus petite taille (512 pixels de côté) ne comporte que seize partitions (de deux à dix-sept) est étudiée à l'aide d'une partition stable de treize classes. On trouvera en annexe les paramètres de variance et de distance entre classes et strates (cf. Annexe 5).

Enfin, la troisième étape consiste à réaliser une classification automatique sur le Péricolor 2 001. Cette classification, réalisée sous l'hypothèse du maximum de vraisemblance, utilise les paramètres de moyenne et de variance calculés par la procédure des nuées dynamiques pour chaque classe de la partition. A ce niveau de l'analyse, il est enfin possible de visualiser l'organisation spatiale des partitions.

Notons qu'habituellement les classifications par maximum de vraisemblance sont des classifications supervisées (cf. 4.3.2.2. et 8.2.). Lorsqu'elles sont utilisées comme des méthodes non supervisées, c'est le cas ici, elles en adoptent les avantages et les inconvénients. Il n'est par exemple pas possible de moduler les seuils de rejet thème par thème. Dans le cas présent, les seuils de rejet sont les mêmes pour tous. Ils sont calculés au seuil de 95 p.100 sous la même hypothèse de normalité de la distribution. De ce fait, la classification comporte encore un peu moins de 1 p.100 des pixels de l'image qui ne sont pas classés, mais la réalisation de la classification ne nécessite aucune connaissance extérieure.

Il est possible d'utiliser de deux manières ces classifications, soit comme une aide à l'enquête de terrain, soit comme document de stratification. Avant la mission, dans le cas du document de terrain, l'interprétation des contenus de classes est très subjective et doit se limiter à quelques hypothèses. Ce document est surtout destiné à vérifier qu'à l'intérieur des segments on a bien des unités d'observation compatibles avec l'aire minimale d'observation précédemment calculée (cf. 6.3.).

figure 7.1 - Evolution de la variance inter et intra-strates sur la première composante principale



Valeur de la différence entre deux écarts-types successifs (en comptes numériques)

Nous avons pour cela reporté le tracé des segments d'enquête sur le résultat des classifications automatiques de Rosso (cf. fig. 7.2) et Lekseiba (cf. fig. 7.3). Bien qu'ici l'échelle de publication ne soit pas suffisamment grande, on se rend compte qu'il est possible de contrôler, à l'écran ou sur des tirages à plus grande échelle, avec quelle fréquence chaque thème potentiel est rencontré et si sa taille est compatible avec les impératifs de localisation. Les segments tracés ont été utilisés lors de la mission de 1988. Ils servent d'ailleurs pour la publication des résultats des chapitres 8. et 9. Leur taille est de 600 m de côté.

Plusieurs remarques peuvent être faites sur ces classifications. D'un point de vue formel, on notera qu'elles sont équipées d'une légende qui n'est pas organisée. L'ordre est celui qui est imposé par l'algorithme de classification, nous n'y avons pas touché.

En revanche, et dans un but de publication, nous avons effectué une mise en couleur des différentes classes en fonction d'hypothèses thématiques qu'il est possible d'émettre avant d'aller sur le terrain. Ces hypothèses s'appuient essentiellement sur l'analyse des canaux bruts et des indices de végétation et de brillance. Nous n'avons toutefois pas explicité ces hypothèses dans la mesure où, à cette étape de la recherche, ces classifications servent pour contrôler l'adéquation terrain-échantillon et de support d'enquête. Le contenu thématique n'est abordé qu'après la mission.

De plus, nous avons pris le parti de ne pas mettre ces classifications en géométrie, ni aucune autre d'ailleurs, car elles servent essentiellement à sélectionner les thèmes qui recevront des parcelles d'observation sur le terrain et non à se localiser. On notera aussi la présence d'une classe de rejet, en noir, où les pixels non classés (NC) sont regroupés. Il s'agit de thèmes dont l'effectif était trop réduit dans l'échantillon et qui ont été éliminés. Ils représentent 0,7 p.100 de l'effectif total de l'image à Rosso, soit à peine plus de 310 ha, et 0,5 p.100 de celle de Lekseiba, soit à peine plus de 210 ha.

L'analyse de l'implantation des segments sur les classifications en 15 thèmes permet de voir que certains thèmes sont très peu concernés par les sites d'enquête. En effet, il est tout à fait possible de comptabiliser le nombre de fois où l'on rencontre chaque "couleur" sur l'ensemble des segments. Si l'on constate que certaines "couleurs" ne totalisent qu'une à deux observations, alors l'inventaire sera peu adapté à l'analyse de ces thèmes. Il est dans ce cas préférable de tirer un autre échantillon jusqu'à obtenir une répartition satisfaisante.

La classification automatique préparatoire permet donc de déterminer en fonction du protocole d'échantillonnage quel peut être la qualité attendue sur les différents thèmes radiométriques mis en évidence. Si, comme dans le cas présent, on

constate que le plan d'échantillonnage ne peut donner satisfaction, il faut y apporter certaines modifications.

En fonction du temps d'enquête dont on dispose, il est possible de proposer plusieurs solutions, deux concernent la taille et le nombre des segments d'enquête. Soit la taille des segments est réduite et leur nombre est augmenté, dans ce cas le taux de sondage ne varie pas, soit on accroît simplement le nombre des segments, et le travail d'inventaire est plus lourd. Il est enfin possible, sans toucher au plan de sondage, d'améliorer la prise en compte des différents thèmes. Il convient pour cela d'en réduire le nombre.

En effet, bien que l'on parte d'une partition très stable de l'espace radiométrique, il est tout à fait concevable d'effectuer des regroupements thématiques, et d'améliorer ainsi la prise en compte de la diversité thématique par l'échantillon. Dans ce cas, l'agrégation successive des thèmes est grandement facilitée par une connaissance antérieure du terrain. En l'absence de celle-ci, il faut recourir à des procédures qui, sur des critères radiométriques, proposent une série d'agrégations successives et indiquent les filiations de chacun des niveaux (cf. Annexe 5).

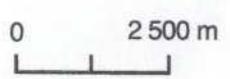
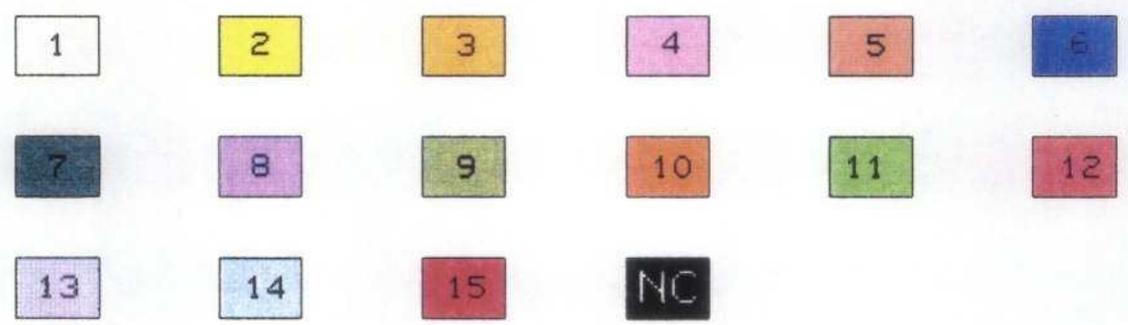
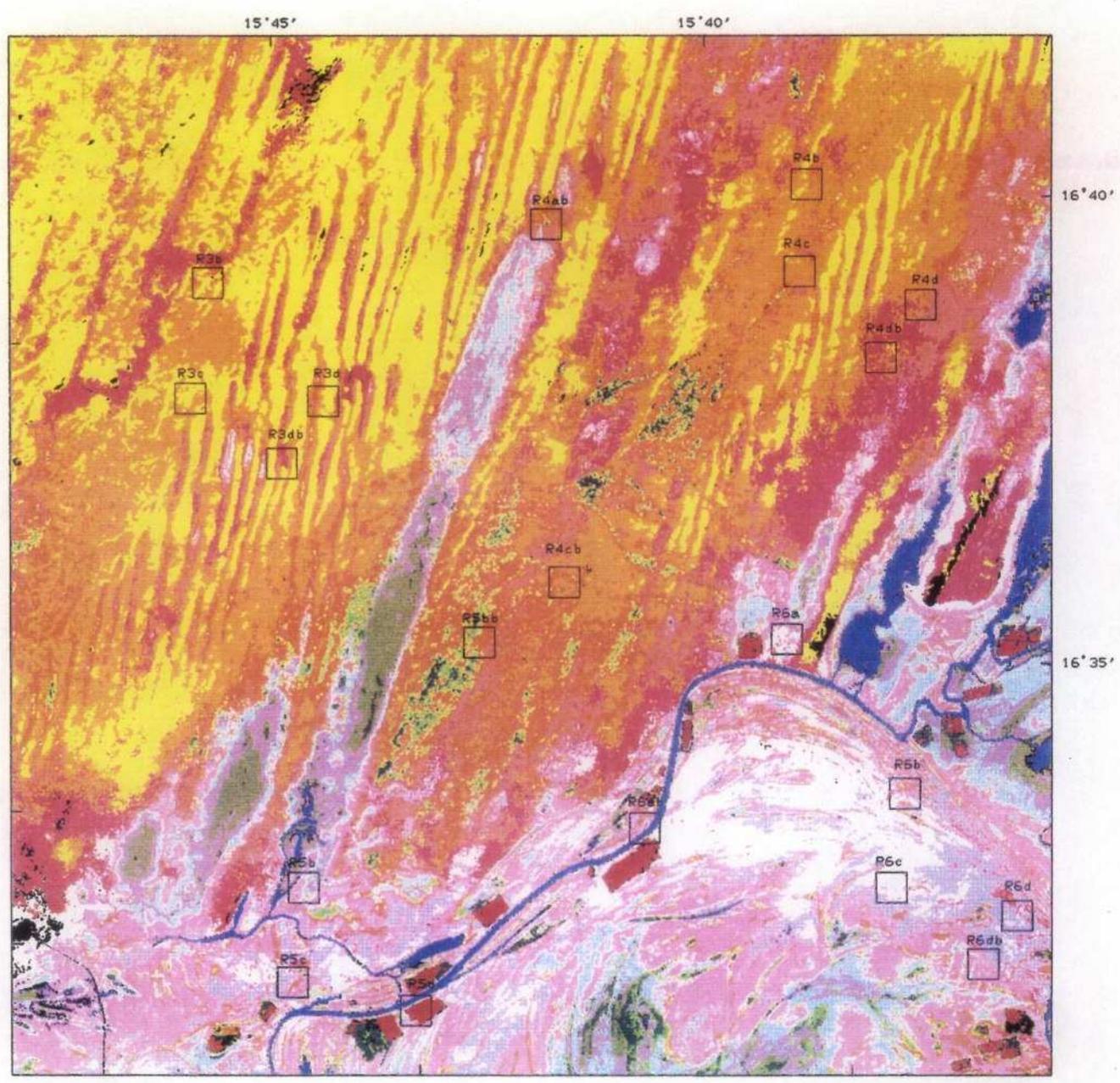
Nous aurions souhaité à l'instar de C. Malek¹ pratiquer les agrégations à l'aide de classifications du type classification ascendante hiérarchique, mais nous n'avons pas eu le temps d'expérimenter cette voie. Nous avons eu recours aux renseignements fournis dans la procédure Fastclus. Celle-ci indique pour chaque nuée quelle est celle qui lui est le plus proche et donc celle avec laquelle il est possible de l'agréger dans une partition de taille inférieure.

Cette méthode ne permet pas toujours de remonter directement au sommet de l'arborescence, car d'un niveau de partition à l'autre, la procédure Fastclus redistribue les identifiants de chaque classe. Le suivi des filiations y est donc assez compliqué contrairement aux procédures de type classification ascendante hiérarchique.

La compression du nombre de thèmes potentiels est une première approche de la procédure de stratification. Si dans le premier cas, pour accroître la précision des estimations, on diminue légèrement le nombre de thèmes en regroupant les plus semblables, dans le second, ce regroupement est beaucoup plus marqué, car pour les zones pilotes nous n'avons conservé suivant les étapes que de deux à cinq strates (cf. 7.1.2.). Nous venons de démontrer l'intérêt des classifications automatiques préparatoires, il nous reste à voir le stade suivant, celui de la stratification automatique par agrégations successives.

¹MALEK 1989 p.24

figure 7.2 - Résultats des classifications automatiques de la zone pastorale de Rosso



Filiation et analyse
(cf. Annexe 5)



figure 7.4 - Exemples de stratifications automatiques pour Rosso
et Lekseiba

fig. 7.4a - Rosso 5 strates

fig. 7.4b - Rosso 3 strates-masques

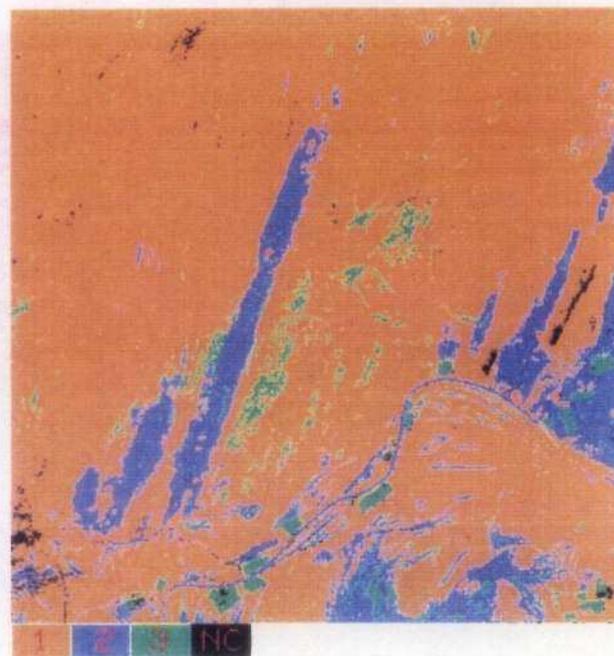
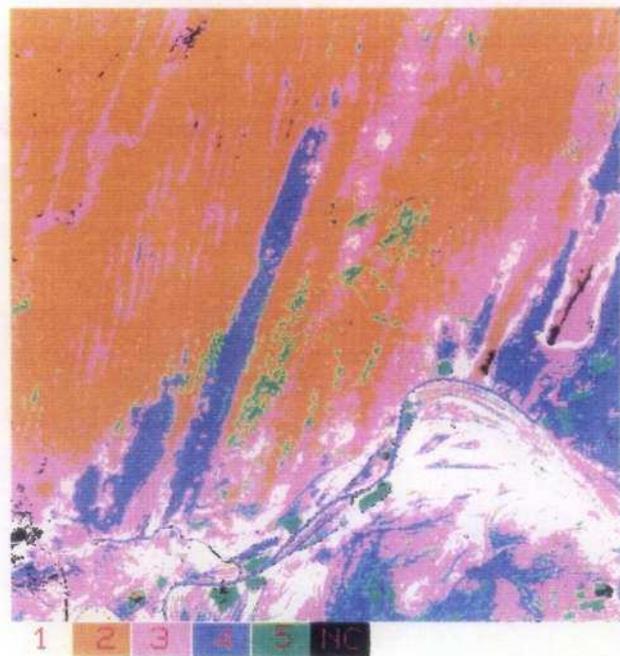
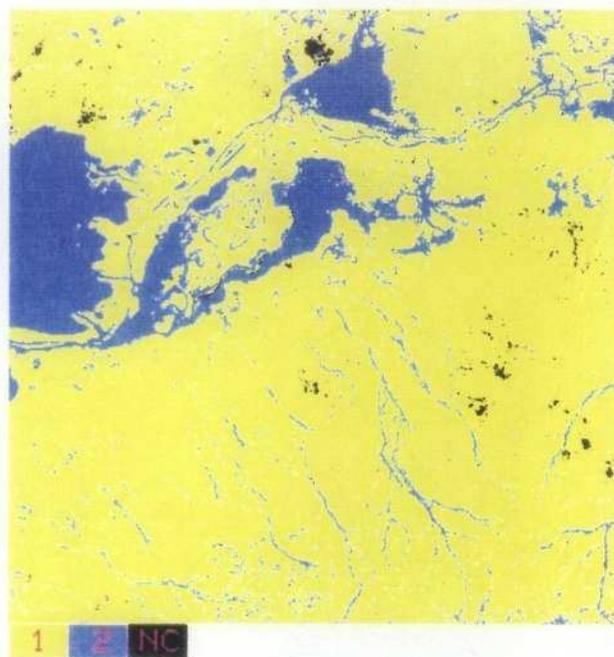
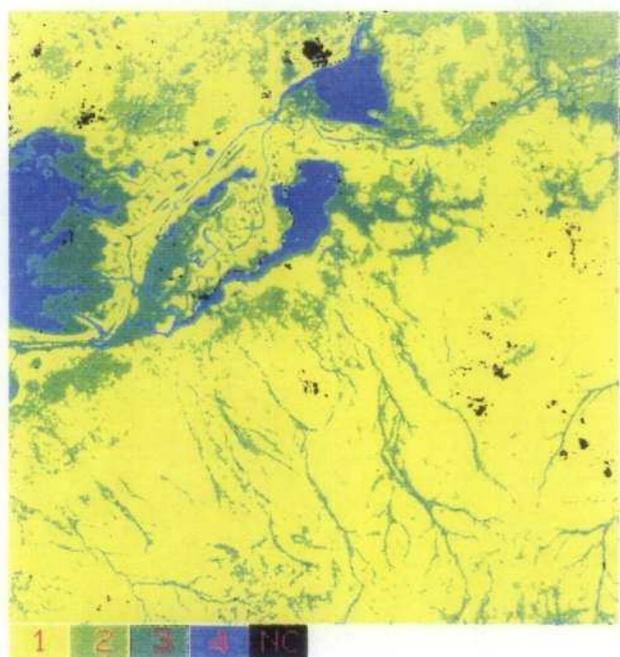


fig. 7.4c - Lekseiba 4 strates

fig. 7.4d - Lekseiba 2 strates-masques



0 5 000 m



Filiation et analyse
(cf. Annexe 5)

figure 7.5 - Images tests et parcellaire de cultures irriguées (zone pilote de Rosso)

fig. 7.5a - Image test origine

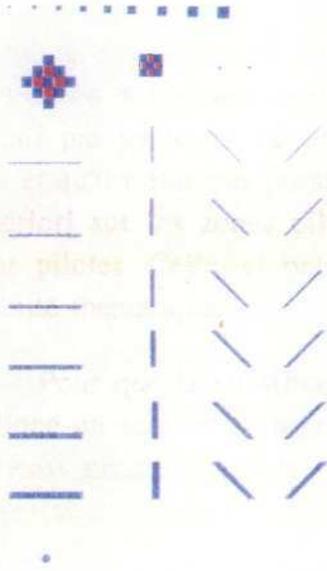


fig. 7.5b - Après analyse de formes

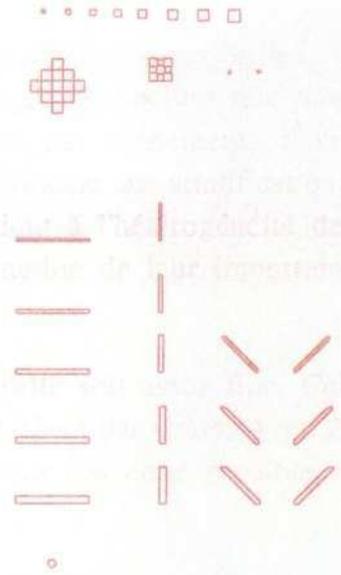
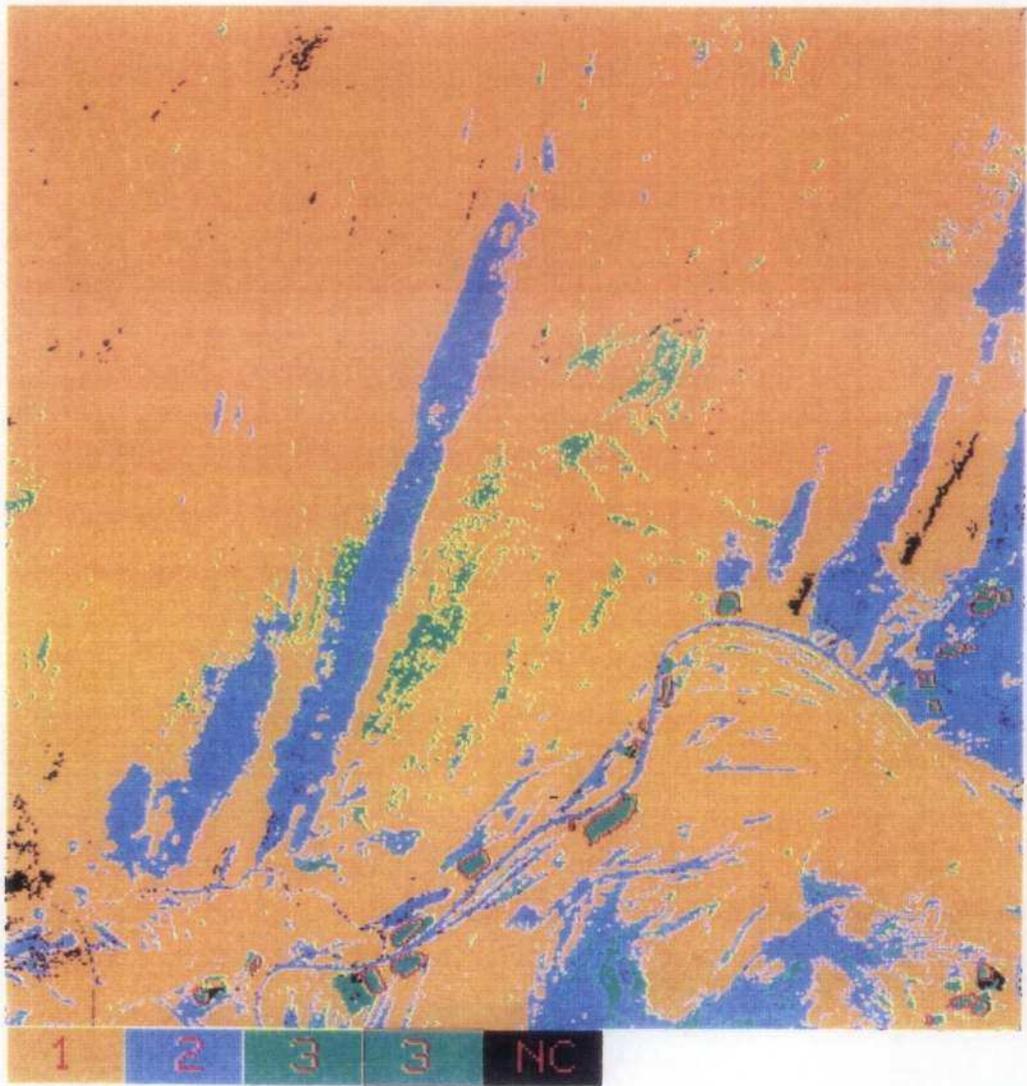


fig. 7.5c - Localisation des parcelles irriguées sur la classif. en 3 strates



0 3 000 m



Filiation et analyse (cf. Annexe 5)

7.1.2. Strates et masques

Nous venons de voir la réalisation et l'usage des classifications automatiques dans la préparation d'un sondage élémentaire. Dans le cas d'un sondage stratifié la procédure est analogue. Que la stratification soit a priori ou a posteriori, la constitution des strates peut être réalisée de la même façon. Rappelons que nous n'avons pas pu tester de stratifications a priori en raison des événements d'avril 1989 et qu'il n'était pas possible de réaliser sur le même principe une stratification a posteriori sur les zones pilotes. La principale raison tient à l'hétérogénéité des zones pilotes. Celles-ci ont en effet été choisies en fonction de leur importante diversité thématique.

Pour que la stratification soit efficace, il faut qu'elle soit assez fine. Cela implique un nombre de segments d'enquête suffisamment élevé par strate. Avec 20 segments pour l'ensemble de chaque zone pilote, il n'était pas donc possible de réaliser de stratifications a priori ou a posteriori.

Cependant, nous avons pourtant réalisé une stratification proche des stratifications a posteriori dans la mesure où elle est effectuée après l'enquête de terrain. Son but est aussi d'optimiser les statistiques d'occupation du sol mais en améliorant d'abord la cartographie. Les strates ainsi créées sont appelées **strates-masques** car elles sont destinées à rendre plus performantes les étapes de classifications supervisées.

Pour obtenir ces strates-masques, plusieurs étapes se succèdent. Il faut partir des classes issues d'une classification automatique, elles sont le résultat d'une combinaison algorithmique des valeurs spectrales. Dans l'étape suivante, celle de la stratification morphologique, les classes sont groupées par type de milieu. On s'appuie pour cela sur la notion de structure de l'information. Enfin, la dernière étape est celle des strates-masques qui combinent l'analyse radiométrique et l'agencement spatial. En pratique on regroupe entre elles certaines des strates précédemment constituées.

Ces masques permettent de faire tourner les classifications supervisées par type de milieu. Le résultats des classifications s'en trouve affiné et, dès lors, par l'intermédiaire de l'estimateur par la régression, les résultats statistiques sont plus précis (cf. 4.3. et 9.).

Les strates-masques sont en général peu nombreux car ils opposent souvent un maximum de deux voire trois domaines radiométriques et/ou géographiques à savoir, les zones sèches et les zones humides, les zones d'ombre et les zones ensoleillées, les secteurs sous brume de ceux qui en sont exempts, etc., dans certains

cas ce peut être la combinaison de tout ou partie de ces différents paramètres. Ces masques regroupent les thèmes par comportement radiométrique. R. Manières¹ a obtenu de très bon résultats dans cette voie sur une partition en fonction du niveau de réflectance ; nous nous sommes inspiré de son mode exploratoire.

La nécessité de réaliser les classifications sous masques vient du fait que des thèmes différents ont parfois un comportement radiométrique analogue. Nous avons rencontré ce problème à Rosso avec les végétations herbacées qui s'installent sur les sols précédemment inondés du wallo. Cette végétation présente une forte analogie radiométrique avec les steppes herbeuses du diéri à la date de prise de vue (11 novembre 1987). Nous avons rencontré un problème similaire lors des traitements de la zone pilote de Lekseïba entre les affleurements rocheux où la strate ligneuse est assez dense et la steppe arbustive des zones hydromorphes. La levée des confusions radiométriques est donc souvent liée à des traitements sous masques.

Avant de mettre au point notre procédure de classification automatique et la stratification qui en découle, nous avons dû réaliser des masques par stratifications "visuelles". Comme nous l'avons déjà expliqué (cf. 7.1.1.) cette méthode est fastidieuse, subjective et parfois peu précise. L'agrégation successive des groupes issus de la classification automatique est plus rapide et respecte mieux les seuils radiométriques qu'une délimitation visuelle. Nous allons en proposer deux exemples.

Sur la figure 7.4 sont proposés deux niveaux de stratifications pour chacune des zones pilotes. Le premier est en cinq classes pour Rosso (cf. fig. 7.4a) et en quatre pour Lekseïba (cf. fig. 7.4c). Il correspond au nœud le plus élevé qu'il soit possible d'atteindre dans l'arborescence proposée par la procédure Fastclus. Chacune des strates ainsi obtenues est l'agrégation de quelques-unes des quinze classes issues de la classification automatique (cf. Annexe 5).

Pour réaliser les strates-masques, il est nécessaire d'agréger en deux strates les groupes restants. Pour cela, une analyse même succincte du contenu thématique de ces groupes s'impose. Cette analyse, en plus des connaissances de terrain que l'on vient d'acquérir durant la mission, s'appuie sur les paramètres radiométriques des différentes classes fournis par la procédure Fastclus, ainsi que celles des canaux bruts et des néo-canaux. Elle permet *in fine* de passer de cinq ou quatre strates à deux.

La strate 1 à Rosso (cf. fig. 7.4a) indique les zones très réfléchissantes sèches et dépourvues de végétation. Elles peuvent maintenant être identifiées avec une certaine précision du fait que cette étape se déroule après l'enquête de terrain contrairement à ce qui est la norme pour les classifications automatiques préparatoires ; il s'agit donc ici essentiellement de secteurs argileux ou argilo-

¹ MANIERES 1986 p.169

limoneux décapés. C'est le regroupement des classes 1 et 13 de la partition en 15 classes (cf. fig. 7.2 et A.5.1).

La strate 2, combinaison des classes 2, 3 et 10, concerne des zones moins réfléchissantes, sèches, avec une trace de végétation active. C'est dans une large mesure une steppe très claire sur ensablement. La strate 3 (classes 4, 5 et 12) est caractérisée par un renforcement de la végétation et un caractère xérique moins marqué, mais sec à la date de prise de vue (11 novembre 1987). Ce sont les formations sablo-limoneuses des interdunes et du wallo. La strate 4 (classes 6, 8, 9 et 14) regroupe les thèmes dont le caractère hydromorphe ou hydromorphe et végétal est prédominant et la strate 5 (classes 7, 11 et 15) ceux à végétation active marquée. Les zones non classées (NC) n'ont bien sûr pas disparu et concernent aussi bien des zones très réfléchissantes que des zones à forte activité végétale.

A Lekseiba (cf. fig. 7.4c), la strate 1 (classes 6, 14 et 15 fig. 7.3 et A.5.2) caractérise les zones réfléchissantes où la végétation est très clairsemée. C'est les glacis sablo-limoneux et les ensablements dénudés. La strate 2 (classes 4, 7 et 13) est dotée d'une activité végétale un peu plus nette. Il s'agit bien souvent des zones en situation d'impluvium. La strate 4 (classes 1, 3, 5, 9, 11 et 12) est le domaine de la végétation active avec une hydromorphie plus ou moins marquée. C'est le regroupement des prairies hydromorphes et de la végétation des cordons ripicoles et des éboulements rocheux. Enfin, la strate 3 (classes 2, 8 et 10) regroupe toutes les zones inondées à la date de prise de vue (22 octobre 1987).

Ces connaissances succinctes suffisent pour regrouper les quatre ou cinq strates intermédiaires en environ deux strates-masques par zone pilote. Comme cela a déjà été expliqué (cf. 7.1.1.), nous avons cherché à réaliser un masque qui regroupe les zones sèches et un autre les zones humides. Dans le cas de Rosso (cf. fig. 7.4b), la strate-masque 1 (strates 1, 2 et 3 cf. fig. 7.4a et A.5.1) regroupe les thèmes secs à la date de prise de vue. Elle n'est donc pas le reflet exact du diéri. La strate-masque 2 (strate 4) caractérise toujours l'hydromorphie, c'est la zone d'inondation, le wallo au sens strict. Enfin, pour indiquer que toutes les ambiguïtés ne sont pas levées automatiquement, nous avons conservé sur cette représentation l'ex-strate 5, devenue strate-masque 3, où la végétation active est prépondérante. Cette strate va être découpée "manuellement" pour satisfaire à la répartition entre zone sèche et zone humide, toujours en raison des thèmes que l'on veut exprimer.

En effet, on peut constater que cette strate, en fonction de la localisation des différentes zones qui la constituent, peut aussi bien se rattacher au wallo ou au diéri. Il reste donc à l'affecter par partie à la strate-masque qui lui est la plus proche, en général celui dans lequel elle est incluse. On essaiera de faire de même avec les pixels de la classe de rejet.

Ces deux opérations comportent des risques d'erreurs d'affectation. Ces erreurs sont en partie décelables lors des classifications supervisées sur les segments (cf. 8.2.1.). Si elles sont constatées, il faut alors reprendre le tracé des masques sus-décrits.

Les strates-masques de Lekseiba (cf. fig. 7.4d) sont au nombre de deux. La première (strates 1 et 2 cf. fig. 7.4c et A.5.2) caractérise les zones sèches à végétation clairsemée. La seconde (strates 3 et 4) regroupe les zones inondées et la végétation ligneuse et herbacée active de la figure 7.4c.

Contrairement à la zone pilote de Rosso (cf. fig. 7.4b), où nous avons laissé trois strates-masques, la zone pilote de Lekseiba (fig. 7.4d) n'en présente plus que deux. En effet, le choix d'affectation pour la végétation active est fait. Cette stratification qui n'est pas définitive, montre la végétation active associée à la zone humide. C'est le cas des "filaments" bleus en secteur jaune, ils correspondent en général à une steppe ligneuse dense, voire fermée, concentrée dans les écoulements (cf. Annexe 6). Dans la mesure où nous avons différencié dans les résultats de l'inventaire la steppe arbustive en deux classes distinctes, une classe marquée par le caractère hydromorphe de la végétation et une classe où la végétation est plus sèche, la stratification finale retenue est différente. Les "filaments" bleus ont été rattachés à la strate-masque 1.

En conclusion, il convient de préciser les points suivants. Les classifications automatiques préparatoires s'effectuent sur des données antérieures à l'enquête de terrain. Comme nous l'avons déjà précisé à la section 4.3., ces données correspondent à la saison d'inventaire une ou plusieurs années avant le déroulement effectif de celui-ci. Ce "plusieurs années" est fonction de la vitesse de renouvellement du paysage, dégradation de l'environnement, front agricole, etc.. Il est difficile de donner une règle générale. Pour sa part, H. Andrianasolo¹ indique qu'en dehors des catastrophes naturelles, la périodicité de révision d'une structuration de l'espace par classification des données satellitaires est l'ordre de trois à cinq ans.

Donc la meilleure solution est d'abord de prendre l'image la plus récente au catalogue du distributeur et ensuite, en fonction des années disponibles et des connaissances que l'on a du milieu (feux précoces, sécheresse accentuée, etc.), d'effectuer une sélection judicieuse (!). En revanche, la stratification destinée à réaliser les masques se fait avec les données satellitaires de l'année d'inventaire ou tout du moins avec celles qui vont servir à réaliser les classifications supervisées.

¹ ANDRIANASOLO 1990 p.7

Les classifications automatiques ainsi qu'une de leurs applications, les stratifications automatiques sont opérationnelles, que ce soit pour préparer l'enquête de terrain ou pour améliorer le résultat des classifications supervisées et donc celui de l'inventaire. A partir de ces classifications automatiques préparatoires, il est également possible de faciliter la détermination de la taille du segment d'enquête.

7.2. TAILLE ET STRUCTURE DU "PARCELLAIRE"

Deux méthodes ont été testées pour aider à la détermination de la taille de l'unité d'enquête. Comme cela a été démontré à la section 6.1., ces méthodes doivent venir en complément d'une approche pragmatique et non se substituer à celle-ci. Rappelons que cette détermination ne peut être identique en milieu naturel et en milieu agricole en raison des difficultés que l'on rencontre sur le terrain pour trouver des zones homogènes de taille significative en secteur où la végétation spontanée est dominante (cf. 6.3.). Nous verrons successivement une analyse de la taille du parcellaire puis une analyse de la structure de l'espace.

7.2.1. Détermination de la taille du parcellaire

Nous avons essayé dans ce paragraphe de tester des procédures relevant de la morphologie mathématique, terme barbare qui signifie que l'on ne s'intéresse plus uniquement à la valeur spectrale du pixel mais aussi à la combinaison de celle-ci avec celle de ses voisins. Cette étude des formes du paysage, ne s'appuie plus sur l'entité minimale du fichier radiométrique, le pixel, mais sur l'entité directement supérieure la parcelle. On n'a donc pas fait passer les "opérateurs" sur les fichiers bruts mais sur le résultat des classifications automatiques décrites à la section 7.2.. Cette approche est présentée en deux parties, d'une part la méthode d'autre part les résultats.

7.2.1.1. *Analyse des formes*

Sans entrer dans les principes de l'analyse des formes, nous allons décrire succinctement les étapes et moyens de contrôle mis en œuvre pour déterminer la taille du parcellaire. Rappelons que cette détermination s'effectue sur les classifications automatiques préparatoires. On utilisera celles qui comportent le nombre maximal de classes radiométriquement stables, 15 pour Rosso et Lekseïba et 13 pour les oasis. Comme nous le verrons plus loin, il n'est pas obligatoire d'effectuer l'analyse de forme sur l'ensemble des classes, il est possible de n'étudier qu'un ou quelques-uns des thèmes à la fois.

L'analyse des formes fait appel à un vocabulaire très technique. La définition que nous en donnons peut parfois apparaître simpliste. Pour cette raison, plutôt que de citer *in extenso* les spécialistes, nous préférons envoyer les lecteurs intéressés à l'ouvrage qui nous a servi de référence à savoir, le "*Précis d'analyse d'image*" de M. Coster et J.P. Chermant¹.

Pour analyser le nombre et la taille de chacun des thèmes retenus, la procédure est la suivante. On applique au fichier contenant la classification un filtre de convolution, dans notre cas un filtre de Robert, dont la particularité est de matérialiser les contours, donc les limites entre thèmes. Le filtre de Robert, tel que nous l'avons utilisé, consiste à calculer en chaque point de l'image une dérivée D_1 de direction NE puis une dérivée D_2 qui lui est perpendiculaire. La valeur du point concerné V est la racine carrée de la somme des dérivées au carré, somme divisée par un facteur P . Nous avons retenu celui attribué en standard par le constructeur, soit P égale à un^2 .

$$V = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2}{P}}$$

Cela revient dans notre cas à matérialiser les limites entre les entités thématiques mises en évidence par la classification. Puis, comme nous ne cherchons pas à hiérarchiser les limites entre entités, elles sont toutes mises au maximum. Simultanément, la valeur des parcelles est mise à zéro. A partir de cette étape le fichier est de type binaire ; les opérateurs de morphologie mathématique retenus peuvent s'appliquer.

Ces opérateurs ont été enregistré dans une séquence, ou macro-commande, qui comprend l'enchaînement suivant. L'image est d'abord squelettisée. Cela signifie que s'il existe des limites de plusieurs pixels d'épaisseur, elles sont ramenées à un seul pixel. Le résultat est que les parcelles concernées s'agrandissent par leur périphérie. Ensuite, on procède à l'élimination des points extrêmes, toutes les limites non fermées disparaissent. Puis, les points isolés sont éliminés. Lors de ces deux étapes, les parcelles concernées gagnent des pixels en leur centre. Une fois toutes ces étapes réalisées, il est possible de procéder au dénombrement des parcelles restantes et de calculer certains de leurs paramètres. Nous avons pour notre part uniquement étudié la surface des parcelles.

A l'énoncé de ces opérations, il est aisé de comprendre que par rapport aux limites de départ, avant le filtre de Robert, une partie des petites entités a disparu, alors qu'une partie des grosses s'est développée. Il est donc important de mesurer les

¹COSTER 1985

²NUMELEC 1987 p. IV-3-26

distorsions introduites dans le dénombrement et le calcul de la taille du parcellaire par cette approche. C'est pourquoi nous avons mis au point une mire, ou cible de calibrage, qui sert à mesurer les effets des traitements par opérateurs morphologiques.

Composée de formes beaucoup plus simples (cf. fig. 7.5a) que celles du parcellaire perçu à partir des classifications automatiques, cette mire permet toutefois d'évaluer une partie du biais entraîné par ce mode de calcul. Lorsque l'on compare la mire initiale (cf. fig. 7.5a) et l'image résultante (cf. fig. 7.5b), on remarque que cette succession de traitements fait disparaître tous les objets compacts inférieurs à deux pixels sur trois, soit en pleine résolution pour un pixel de 20 m de côté tous les objets de moins de 40 par 60 mètres.

De plus, on constate que chaque objet restant a perdu une rangée de pixels sur deux de ses côtés. Ceci est dû au trait de binarisation qui, sur le Péricolor, occupe l'épaisseur d'un pixel. En raison de la direction du filtrage, la partie masquée de la parcelle est au sud-est de celle-ci. Une forme carrée de dix pixels de côté à l'origine, soit 100 pixels, ne représente plus après les traitements qu'un carré de neuf pixels de côté, soit 81 pixels et donc une érosion de 19 p.100. A l'opposé, un rectangle de deux pixels sur trois ne représente plus qu'un pixel sur deux après traitement, la perte est beaucoup plus sévère, environ 67 p.100.

Il convient donc de rester prudent vis-à-vis des résultats de ce type de traitement, surtout en présence de micro-parcellaires à formes complexes. L'analyse de formes telle que nous l'avons pratiquée comporte des limites avec lesquelles il faut composer. Nous en avons utilisés les résultats en gardant à l'esprit que ceux-ci doivent être considérés comme des ordres de grandeur.

Notons enfin, que le logiciel regroupant les principaux opérateurs de morphologie mathématique sur le Péricolor 2 001 ne travaille que par fichiers de 512 pixels de côté. Cela signifie qu'il faut soit réaliser la série de traitements autant de fois qu'il y a de sous-fichier de 512 pixels dans le fichier total (!) soit, réaliser les traitements sur un fichier échantillonné en contrôlant la perte d'information.

Les résultats que nous allons présenter maintenant, ne sont exploitables que lorsque l'on a présent à l'esprit les restrictions précédemment émises. En fonction de l'état actuel de nos recherches, les dénombrements et quantifications ne doivent donc être considérés que comme des ordres de grandeur. Reste à savoir dans quelle mesure cela peut permettre d'améliorer la détermination de la taille du parcellaire.

7.2.1.2. *Trois situations*

Les difficultés d'évaluation rencontrées lors de l'analyse du parcellaire par morphologie mathématique, nous ont poussé à déterminer la taille de celui-ci non plus entité par entité mais de manière plus globale. Pour cela, nous avons retenu la taille médiane comme descripteur du parcellaire. C'est un paramètre peu sensible aux erreurs de mesures commises par l'analyse de formes. En effet, il suffit d'ordonner les parcelles de la plus petite à la plus grande, puis de diviser la population en deux parties égales. La taille médiane du parcellaire est connue lorsque l'on a atteint 50 p.100 de l'effectif. Utiliser la taille moyenne n'aurait pas eu une grande signification dans la mesure où la distribution des parcelles est très dissymétrique (cf. fig. 8.1).

- *Résultats sur l'ensemble des thèmes*

La taille médiane du parcellaire est respectivement pour Rosso, Lekseïba et les oasis de 12, 14 et 10 pixels. Cela signifie que la majorité des parcelles des trois zones pilotes est d'une taille inférieure à ce qui peut être théoriquement enquêté sur le terrain (neuf pixels), et cela en dehors de tout problème de localisation. On trouvera sur la figure 8.1 des graphique indiquant par groupe de taille et par zone pilote la répartition des parcelles. Il faut s'interroger maintenant sur la façon d'utiliser ces résultats.

A ce stade de l'étude, il n'est pas possible de savoir si la petite taille du parcellaire théorique est liée à un artefact de traitement (phénomènes de bordures, etc.) ou à une certaine réalité du terrain. Cet aspect ne peut être analysé qu'après le retour de mission et le dépouillement de l'enquête (cf. 7.3.). Pour résoudre ce problème avant la mission, il faut éliminer les parcelles qui n'atteignent pas un certain seuil, car leur surface est trop restreinte pour être enquêtée et d'autre part, l'estimation de leur superficie est entachée d'un biais très important (cf. 7.2.1.1.).

La détermination de ce seuil repose logiquement sur l'utilisation de l'aire minimale d'observation dont le concept a été développé au point 6.3.2.3.. En fonction des différentes configurations retenues, plusieurs tailles d'aire minimale peuvent être utilisées. Nous avons sélectionné celle qui fournissait après seuillage suffisamment de parcelles pour les calculs.

En effet, comme le tableau 7.2 l'indique, en fonction de la taille de l'aire minimale, le nombre de parcelles concernées par le seuillage est plus ou moins important. A titre d'exemple, si l'on élimine toutes les parcelles qui font moins de 3,2 ha (configuration B de l'aire minimale absolue cf. tab. 6.4), le calcul de la taille de la parcelle théorique médiane ne peut plus s'effectuer que sur 11,8 p.100 de

l'ensemble des parcelles de Rosso, 20,5 p.100 de celles de Lekseiba et 9,6 p.100 de celles des oasis.

Nous avons estimé qu'il fallait que le calcul de la médiane se fit sur au moins 20 p.100 de parcelles pour que l'on ait une chance, une fois sur le terrain, d'en enquêter quelques unes par segment. De ce fait, **l'aire minimale retenue est de deux hectares**. Elle a été préférée au seuil de 3,2 ha, car seule Lekseiba atteignait les 20 p.100 choisis. De même, bien que nous ayons indiqué les résultats pour un seuil d'un hectare, celui-ci n'a pas été sélectionné car il ne satisfaisait pas aux conditions décrites au point 6.3.2.3. pour constituer une aire minimale d'observation.

tableau 7.2 - Pourcentage de parcelles restant après seuillage en fonction de l'aire minimale retenue

Aires minimales en ha	Rosso %	Lekseiba %	Oasis %
1	57,4	61,6	56,0
2	21,7	27,5	20,1
3,2	11,8	20,5	9,6
7,8	4,0	8,1	2,4
10,2	2,8	2,1	1,4
17,6	1,4	1,4	0,9

Rappelons qu'une aire minimale de deux hectares est difficile à obtenir en milieu naturel pour l'Afrique de l'ouest (cf. 6.3.2.3.). Elle n'est atteinte avec fiabilité que pour la configuration A (ou une très bonne localisation à l'œil). Cependant, rappelons que la qualité de la localisation "à l'œil" en milieu naturel est très souvent impossible à analyser et donc à contrôler.

Une fois l'élimination des parcelles d'une taille inférieure à deux hectares réalisée, il est possible de calculer une taille médiane du parcellaire des différentes zones pilotes compatible avec notre problématique d'enquête. **Dans le cas de Rosso**, zone pilote de 20,48 km de côté, **la taille médiane du parcellaire**, une fois éliminées toutes les parcelles de moins de deux hectares, **est de 3,9 ha**. Cette valeur médiane est calculée sur 3 947 parcelles contre 18 216 au départ, soit 21,7 p.100. **En ce qui concerne celle de Lekseiba**, **la taille médiane est de 3,8 ha**. Elle est quant à elle calculée sur 5 184 parcelles contre 18 876 à l'origine. **Enfin, pour la zone pilote des oasis** (10,24 km de côté), **la taille médiane est de 3,4 ha**. Elle concerne 1 079 parcelles sur 5 373.

Il faut constater qu'à partir des résultats de classifications automatiques et en fonction du seuil minimal choisi, la taille médiane des trois parcellaires est assez

proche, entre trois et quatre hectares. Pour des seuils différents, ceci n'est plus exact. En effet, pour une aire minimale de 7,8 ha (configuration C et D), la taille médiane est de 13,8 ha à Rosso, 8,1 à Lekseïba et 9,6 pour les oasis. Pour ce niveau d'analyse, les paysages peuvent être considérés comme relativement différents.

Dans notre cas, le seul paysage qui se démarque un peu des autres est celui des oasis qui, bien qu'issu d'une classification comportant moins de thèmes (13 contre 15), est constitué de parcelles plus petites. La différence ne semble toutefois pas très significative. De ce fait, dans le but de simplifier des comparaisons ultérieures, il est probablement possible de réaliser un inventaire pastoral des trois zones pilotes avec des segments de même taille.

A partir des tailles médianes, nous avons calculé quelles étaient pour différentes surfaces de segments le nombre de parcelles qu'ils pouvaient contenir. Puis nous avons sélectionné le segment qui nous paraissait optimum par zone pilote. Comme cela a été démontré au paragraphe 6.1.2., les côtés des segments sont choisis comme multiples de 100 mètres. Les segments ont donc une superficie qui "tombe rond".

tableau 7.3 - Nombre de parcelles médianes par segment

Surface du segment en ha	Côté du segment en mètres	Nombre de parcelles		
		Rosso	Lekseïba	Oasis
		3,9	3,8	3,4
4	200	1,0	1,1	1,2
9	300	2,3	2,4	2,6
16	400	4,1	4,2	4,7
25	500	6,4	6,6	7,4
36	600	9,2	9,5	10,6
49	700	12,6	12,6	14,4
64	800	16,4	16,8	18,8

Le calcul est effectué pour des parcelles de plus de 2 ha. La taille médiane du parcellaire est rappelée sous chaque zone pilote.

Le tableau 7.3 se lit de la façon suivante. A titre d'exemple, dans le cas des oasis et pour un segment de 16 ha, il y a 50 p.100 de chance que le nombre de parcelles soit supérieur à 4,7 parcelles, dans ce cas-là elles seront plus petites, et 50 p.100 de chance pour qu'il y en ait moins, et donc qu'elles soient plus grandes.

Ne perdons pas de vue que ce résultat est fonction du nombre de catégories déterminées par la classification automatique. S'il y avait eu moins de 13 classes pour les oasis, les parcelles auraient été plus grandes et donc moins nombreuses pour un segment de même taille. Il faut donc prendre ce résultat comme un ordre de

grandeur permettant d'affiner le choix effectué au paragraphe 6.1.2.1. en fonction des contraintes de terrain, pour mémoire 36 ha en secteur agropastoral.

Il est intéressant, même a posteriori, d'analyser le nombre de parcelles théoriques que l'analyse de formes attribue aux segments de chaque zone pilote, puis de voir si actuellement, en fonction de cette analyse, nous referions un choix analogue quant à la taille des segments. Ce choix sera comparé aux résultats réellement obtenus à la suite de l'inventaire (cf. 7.3.).

En fonction du protocole d'étude précédemment décrit, **un segment de 36 ha contient en théorie un peu plus de neuf parcelles "enquêtables" pour Rosso et Lekseiba et presque onze pour les oasis.** Comme nous le verrons plus loin (cf. 7.3.), le nombre de parcelles réellement enquêtables est inférieur à la dizaine. En effet, le nombre de thèmes identifié sur le terrain est inférieur à celui que les classifications ont déterminé. De plus, nous avons eu recours à des aires minimales d'observation parfois supérieure à deux hectares en raison de problèmes de localisation.

Si l'enquêteur considère qu'une dizaine de parcelles à inventorier par segment représentent en milieu naturel un nombre de sites d'observation trop élevé, il est toujours possible de réduire la taille du segment. Un site d'enquête de 25 ha semble alors être un bon compromis, car sur les trois zones pilotes, celui-ci renferme encore environ sept parcelles.

Cette volonté de ne pas enquêter un nombre trop important de parcelles est lié aux problèmes d'identification et de localisation des aires d'observation sur le terrain. Pour limiter les risques d'erreur (omission ou doubles comptes), il est préférable de réduire le nombre de sites à visiter. Le nombre d'unités d'observation en milieu naturel, tropical de surcroît, sera donc largement inférieur à celui préconisé en milieu agricole tempéré. Ph. Fournier et J. Meyer-Roux¹ conseillent d'utiliser entre 20 et 40 parcelles par segment suivant la variabilité du milieu. Il nous faut cependant rappeler que la localisation est plus aisée et fiable sur du parcellaire agricole qu'en milieu naturel.

Un segment de taille inférieure à 25 ha, hormis la multiplication des problèmes de localisation et de liaison entre les sites d'enquête, risquerait de trop restreindre la diversité des thèmes inventoriés. En effet, il est parfois nécessaire de trouver des aires minimales d'observation plus importantes que prévues.

¹FOURNIER 1985b p.11

En conclusion, il ressort de cette étude de la taille du parcellaire, qu'un choix de segments de 36 ha est relativement bien adapté au paysage des trois zones pilotes. Un segment de 25 ha semble toutefois offrir une diversité de parcelles suffisantes en regard de notre problématique. Cependant celui-ci n'est pas compatible avec les capteurs MSS et TM (cf. 4.3.2.1.). Une bonne adéquation entre le paysage et la taille du segment doit aussi prendre en compte ces paramètres.

Si nous avons à refaire cette enquête, en fonction des contraintes de temps d'enquête, de taux de sondage et de compatibilité entre capteurs, la taille des segments serait réduite de 36 à 25 ha et ils seraient plus nombreux à être inventoriés. Les résultats statistiques, et dans une moindre mesure cartographiques, confortent cette analyse (cf. 9.1.2. et 9.3.).

Dans le but de simplifier les comparaisons, il est probablement préférable que, pour une même série d'investigations, les tailles des segments soient les mêmes pour toutes les zones pilotes. De même, toujours pour simplifier les analyses d'évolution du paysage, d'une année sur l'autre il ne faut pas déplacer les segments ni réduire leur taille, tout au plus peut-on en réduire ou accroître le nombre (cf. 6.4.2.).

- Résultats pour une sélection de thèmes

On ne souhaite pas toujours adapter la taille du segment à l'ensemble des paysages présents. Il est parfois plus utile d'adapter celui-ci à une ou plusieurs spéculations particulières. Deux exemples vont être traités ici, l'un sur du parcellaire agricole, l'autre sur la strate des palmeraies dattières et les thèmes centrés sur l'activité oasienne.

L'analyse de formes sur du parcellaire agricole a été testée sur les cultures irriguées de Rosso. Après avoir isolé ce thème sur la classification automatique, on lui applique la procédure décrite précédemment. Notons que c'est leur forme géométrique (cf. classe 15 fig. 7.2) et un fort indice de végétation qui permettent de les identifier avant d'avoir été sur le terrain.

L'analyse de formes individualise 52 objets de tailles assez variables. Il convient de s'interroger sur l'opportunité de recourir à un seuil pour éliminer, comme précédemment, les parcelles de trop petite taille. Nous avons pensé que pour des cultures irriguées, le recours à l'aire minimale d'observation ne s'imposait pas. En effet, s'il n'y a pas de confusion thématique, les parcelles agricoles en cultures irriguées sont toujours identifiables par rapport aux thèmes attenants et d'autre part, lorsqu'elles sont plusieurs côte-à-côte, il est toujours possible de se localiser de

proche en proche. De ce fait, elles ont toutes été conservées contrairement à la phase d'analyse globale présentée précédemment.

La taille médiane du parcellaire agricole en cultures irriguées est d'environ 1,4 ha, soit beaucoup moins que pour l'analyse globale seuillée où la taille médiane était comprise entre trois et quatre hectares. Les plus petites parcelles font environ un quart d'hectare et la plus grande neuf hectares sans qu'il soit possible de savoir, avant d'aller sur le terrain, si celle-ci est d'un seul tenant ou si la résolution du satellite est insuffisante pour en différencier le parcellaire foncier ou de culture.

Pour une étude spécifique du parcellaire irrigué dans la zone pilote de Rosso un segment de 36 ha se révélerait parfaitement inadapté, car il contiendrait théoriquement 26 parcelles. Le segment de neuf hectares semble plus adapté car il peut regrouper environ six parcelles, alors que celui de quatre ne peut en englober que trois. Cependant, la dispersion dans le wallo des périmètres irrigués constitue un problème que l'analyse de formes ne peut résoudre à elle seule.

D'une part, il est inutile d'enquêter le diéri alors que l'on sait ne trouver de cultures irriguées que dans le wallo ; il est donc important de recourir à une stratification morphologique préalable (cf. 4.3.1.1.). D'autre part, ce thème compact et de petite taille, moins de un pour cent de la superficie de la zone pilote (cf. 9.1.2.), doit pour que l'estimation de sa superficie soit précise être échantillonné avec beaucoup de segments, sinon il y a peu de périmètres qui seront inventoriés.

Pour visualiser la concentration de ce thème et les limites des parcelles irriguées détectées par l'analyse de formes, nous avons porté sur la strate trois (cf. fig. 7.5c) les limites des parcelles irriguées. Ces limites ont été obtenues comme nous l'avons décrit précédemment, c'est-à-dire par l'analyse de formes du thème 15 de la figure 7.2. Elles permettent ainsi de visualiser la concentration de ce thème, et les problèmes d'appréhension qui en découlent. L'étude de ce type de thème compact et de faible extension peut nécessiter à lui seul un plan de sondage dès lors qu'il représente un intérêt particulier tout comme le parcellaire agro-oasien.

Contrairement aux périmètres irrigués de Rosso, l'extension des palmeraies dattières de la zone pilote des oasis n'est pas facilement localisable avant l'enquête de terrain proprement dite. Il n'est donc pas possible d'extraire a priori la classe des palmeraies comme précédemment. Cette recherche doit se mener sur les deux ou trois classes susceptibles de contenir les données recherchées. Puis, sur celles-ci, l'analyse de formes sera réalisée pour calibrer les segments.

La procédure est la suivante. A partir de la classification en 13 thèmes (cf. fig. 7.6a) une stratification en trois groupes est opérée comme décrit au 7.1.. La strate trois (cf. fig. 7.6b) regroupe les thèmes pour lesquels la probabilité "d'activité

oasienne" est la plus forte, c'est-à-dire ceux pour lesquels il y a conjonction des critères suivants : lit d'oued et forte activité chlorophyllienne. La strate deux regroupe ceux pour lesquels la position topographique est semble-t-il plus élevée et l'activité chlorophyllienne plus basse et où a priori les palmeraies sont absentes. Et enfin, la strate un concerne les zones les plus brillantes où la végétation est très clairsemée. En noir, sont toujours représentés les points non classés (NC). L'incidence de ces non-classés n'a pas été mesuré.

La figure 7.6c représente les trois thèmes constituant la strate trois (cf. Annexe 7). L'analyse de formes est réalisée simultanément et conjointement sur ceux-ci. Le parcellaire ainsi révélé est ensuite juxtaposé sur la classification en trois strates pour le mettre en évidence (cf. fig. 7.6d). Dans la mesure où le parcellaire des oasis n'est pas aussi facilement identifiable que celui des cultures irriguées, doit-on avoir recours à une valeur seuil pour le calcul de la taille médiane du parcellaire ?

Nous n'avons pas déterminé d'aire minimale d'observation pour l'agriculture oasienne contrairement à ce qui a été pratiqué en inventaire agropastoral. L'utilisation du capteur multispectral de SPOT et sa résolution de 20 m en sont la principale cause. En effet, l'aire minimale que nous aurions calculée (cf. 6.3.2.3.) aurait été beaucoup trop grande par rapport au parcellaire. Il nous semble que l'intérêt du calcul de l'aire ne se justifie dans ce cas que pour des documents satellitaires panchromatiques en résolution 10 m dont la mise en géométrie est réalisée avec une carte topographique de référence au 1/50 000. Nous considérons donc qu'actuellement la localisation à l'intérieur des palmeraies de la zone pilote est meilleure à l'œil qu'avec le localisateur par satellite. Ceci n'est pas forcément vrai ailleurs.

Dans ces conditions, quelle valeur seuil faut-il retenir ? Il semblerait qu'en fonction de la taille du parcellaire des palmeraies du groupe de Kouroudjel, en moyenne 0,28 ha¹, cette valeur soit trop basse pour que l'on puisse seuiller sans risquer d'exclure une bonne partie des parcelles de cultures oasiennes.

D'autre part, si l'on n'exclut aucune parcelle du calcul de la médiane, l'analyse de formes dénombre 348 objets. La médiane est alors de 0,9 ha. Les deux segments logiquement les plus intéressants sont quatre et neuf hectares. Celui de quatre peut donc contenir 4,4 parcelles, celui de neuf peut en contenir 10. Est-ce-que ces tailles sont compatibles avec celles des palmeraies ?

¹FAO 1985 p.50

figure 7.6 - Strates et parcellaire de palmeraies

fig. 7.6a - Classification en 13 classes

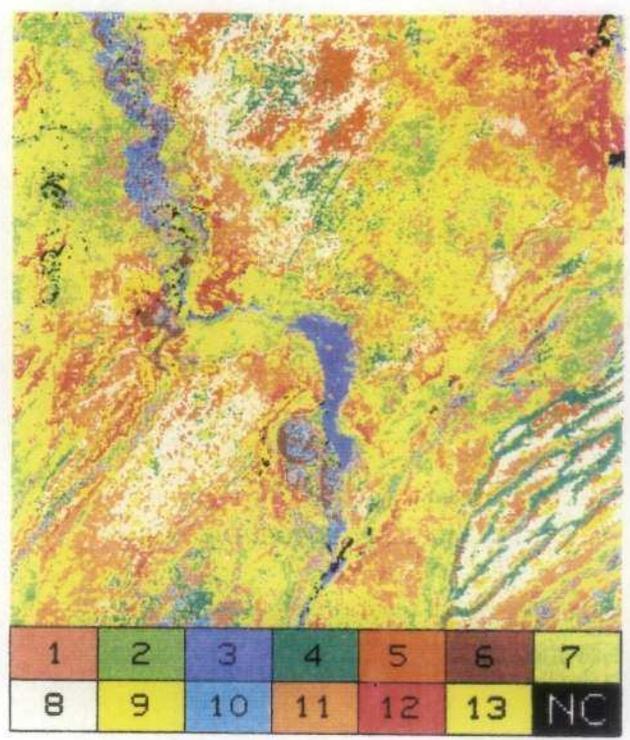


fig. 7.6b - Classification en 3 strates

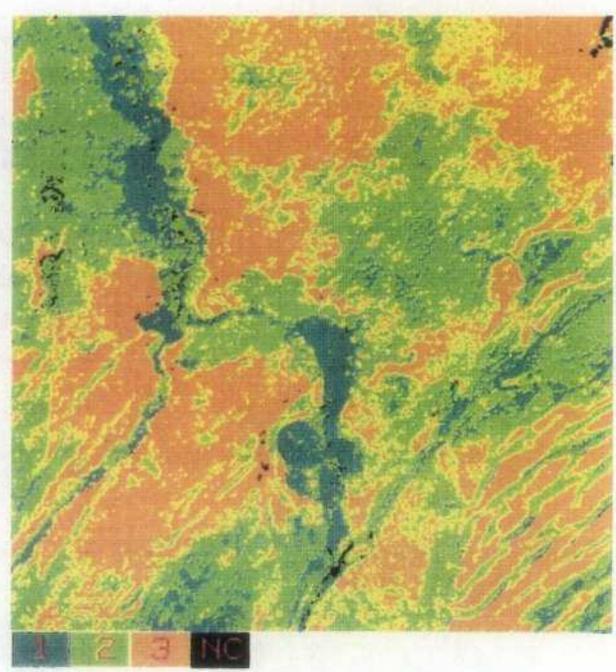


fig. 7.6c - Thèmes "oasiens" de la strate 1

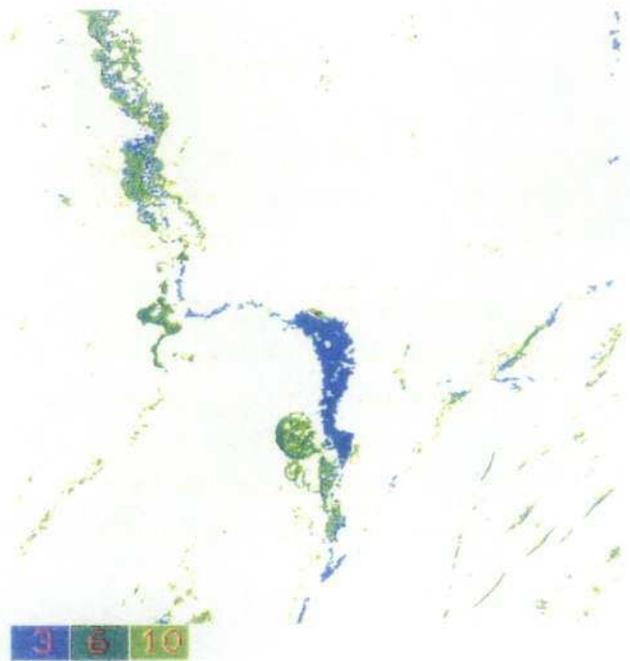
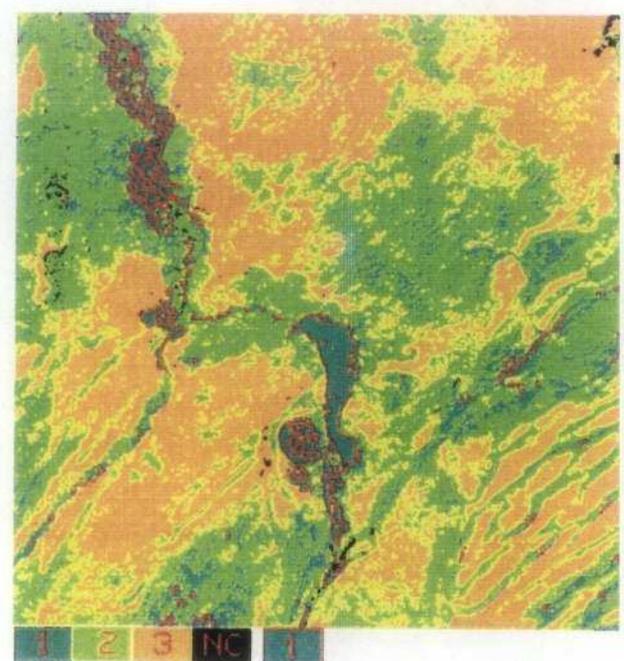


fig. 7.6d - Parcellaire "oasien"



0 5 000 m



Filiation et analyse (cf. Annexe 5)

Il semble que non en raison de la petite taille des palmeraies dattières. Après inventaire, nous avons circonscrit les palmeraies de Kouroudjel et El Fai'ya à l'intérieur de fenêtres d'étude de 2,5 km de côté¹. De ce fait, les segments de quatre hectares, 200 m de côté, sont trop grands pour être représentatifs de la palmeraie, à plus forte raison celui de neuf hectares. Car même en sondant à 5 p.100, il en tiendrait tout au plus quatre dans les limites de celles-ci. On touche là un des problèmes de l'inventaire d'occupation du sol par télédétection. En effet, dès lors que la zone d'étude est de taille restreinte, pour assurer la représentativité de l'inventaire par sondage aréolaire, il est nécessaire de recourir à des segments de petites tailles.

Dans la mesure où l'on ne connaît pas la localisation et l'extension exacte des palmeraies, il est nécessaire d'étudier l'ensemble de la strate qui les renferme. Pour cela l'analyse de formes permet à moindre frais de connaître la taille du parcellaire médian et donc de sélectionner une taille de segment compatible avec les thèmes présents. Dans notre cas, un segment de quatre ou neuf hectares est probablement satisfaisant. La phase de terrain permettra de circonscrire l'oasis et de proposer lors d'une deuxième phase d'inventaire un plan de sondage plus affiné destiné à la palmeraie proprement dite.

Lorsque l'extension est connue, que ce soit a priori ou a posteriori, les contraintes du plan de sondage sont réexaminées (nombre d'unités d'enquête, taux de sondage, etc.). Comme la résolution du capteur ne permet plus à l'analyse de formes à l'intérieur de la palmeraie de saisir le parcellaire cultural, au moins dans le cas présent, ce sont les contraintes d'enquêtes et de résolution du capteur qui décident de la taille du segment.

A titre d'exemple, si l'on souhaite une vingtaine de segments dans une palmeraie de 2,5 km de côté pour un taux de sondage de 1 p.100, l'unité d'enquête devra faire environ 56 m de côté. Celle-ci sera arrondie à la dizaine supérieure pour atteindre les 60 m de côté et être un multiple des pixels SPOT (3 * 20 m). Le segment contient neuf pixels, soit 0,36 ha, à peine plus que les parcelles culturales. Ce type d'inventaire contraint le chercheur à travailler avec deux tailles de segment différentes.

On atteint ici les limites de la complémentarité entre la résolution du capteur et l'inventaire par méthode aréolaire. En effet, la taille de l'unité d'enquête que l'on vient de définir est équivalente à l'aire minimale relative calculée pour les oasis (cf. 6.3.2.3.). Cela signifie d'une part que l'on risque d'avoir des segments d'enquête monothématiques, alors que l'on recherche une certaine diversité (cf. 6.1.2.1.), et d'autre part, si la zone d'étude est encore plus petite et que l'on souhaite conserver

¹DE WISPELAERE 1989 p.103

plus de 20 unités d'enquête, ces dernières ne seront plus compatibles avec l'aire minimale d'observation.

En conclusion, à l'intérieur d'une même zone d'étude, il est tout à fait possible de faire coexister deux tailles différentes de segment pour un même inventaire. Celui des oasis de l'Assaba en offre un bon exemple. L'inventaire du secteur agropastoral est réalisé avec une taille de segment qui lui est adaptée, taille dont l'adéquation avec le paysage aura été déterminée par analyse de formes, alors qu'un thème d'intérêt particulier, agricole par exemple, verra la strate qui le supporte enquêtée par des segments dont la taille aura été modulée en fonction d'autres critères.

Comme nous l'avons signalé au paragraphe 6.1.2., la taille du segment est d'abord déterminée de manière pragmatique en fonction de contraintes d'enquête du type : temps de mission, taux de sondage, nombre d'unités d'enquête minimal, etc. Bien que nous n'ayons pu le faire avant la mission de terrain, les exemples utilisés montrent qu'il est tout à fait possible d'adapter la taille des segments aux spécificités du paysage. Cette recherche d'adéquation doit permettre une amélioration des statistiques et de la cartographie issues de l'inventaire (cf. 9.1.). Il faut toutefois s'attendre à des calculs plus compliqués dès lors que l'on associe différentes tailles de segments dans les calculs d'estimation.

D'une manière plus générale, cette recherche d'adéquation entre le paysage et le segment est à réaliser pour tous les milieux naturels, dès lors que l'organisation spatiale est inconnue. En effet, bien que Ph. Fournier¹ indique qu'en milieu naturel le tracé du segment ne pose pas de problème, le chercheur en dehors des contraintes d'enquête a peu de repères pour savoir si son plan de sondage est adapté au milieu d'enquête. Cette méthode, ainsi que celle qui va être présentée au paragraphe suivant, est destinée à limiter l'emprise du hasard dans le choix du plan d'échantillonnage.

7.2.2. Analyse morphologique

Au point 3.1.2.2., l'étude de la structure du paysage a été envisagée pour aider à déterminer la taille du segment et mettre en évidence les phénomènes de périodicité thématique lorsqu'ils existent. Les résultats de cette recherche sont présentés ici. Leur apport méthodologique est comparé à celui de l'analyse de formes à partir des classifications automatiques.

Si l'on considère que la valeur spectrale des pixels est une variable régionalisée, c'est-à-dire dont la valeur dépend de l'endroit où ils se trouvent, on

¹FOURNIER 1986 p.11

peut, à la suite de P. Duplat et G. Perrotte¹, considérer que cette variable régionalisée est une réalisation d'une fonction aléatoire intrinsèque. Cela signifie que celle-ci admet une espérance mathématique et une variance, ou moment d'ordre deux. Or, le demi-moment d'ordre deux est le variogramme de cette fonction. Relatant les travaux de G. Matheron², qui le premier présenta le variogramme comme une généralisation de la covariance, P. Duplat et G. Perrotte³ nous proposent une formule applicable aux données de télédétection :

$$\gamma(D,d) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_{i+d} - y_i)^2}{2}$$

où y_i est le premier point tiré au hasard, y_{i+d} le deuxième point du couple pris à une distance "d" de y_i dans la direction "D". Le nombre de couples tirés aléatoirement par distance et par direction a été fixé arbitrairement à 500. La distance maximale étudiée n'a jamais dépassé la moitié du fichier sur les petites fenêtres (70 pixels de côté) et le tiers du fichier sur les zones pilotes. Enfin, rappelons que cette analyse a été réalisée sur les données brutes pour différents canaux.

A l'aide de quelques exemples, nous allons voir quel est l'apport de la variographie dans le choix des tailles de parcelles échantillons. Nous avons sélectionné, à titre de premier exemple, une petite fenêtre (70*70 pixels) de la zone pilote de Rosso dans les ondulations dunaires d'axes sommitaux pratiquement N-S (cf. fig. 7.2). Ce sont les alignements dunaires de la petite phase sèche orientés N-NE/S-SW (cf. 3.1.1.).

Deux variogrammes sur les quatre analysés sont reproduits ici (cf. fig. 7.7). Nous avons sélectionné d'une part une direction perpendiculaire à l'axe des dunes, c'est la direction E-W, et d'autre part une direction proche de cet axe, c'est la direction N-S. Ces deux directions sont les plus significatives en raison de leur orientation. Les deux directions obliques (NW-SE et NE-SW) ne sont, dans le cas présent, qu'une combinaison de ce qui va être décrit sur les variogrammes retenus, elles ne sont donc pas présentées dans ce travail.

Toujours pour ne pas surcharger ce travail, sur les sept canaux et néo-canaux étudiés, seuls les Indices de Brillance (IB) et l'Indice de Végétation (IV) sont représentés, l'Indices de Brillance en raison de sa forte dynamique et l'Indice de Végétation en raison de sa forte corrélation spatiale. On peut schématiquement décrire les variogrammes de la façon suivante.

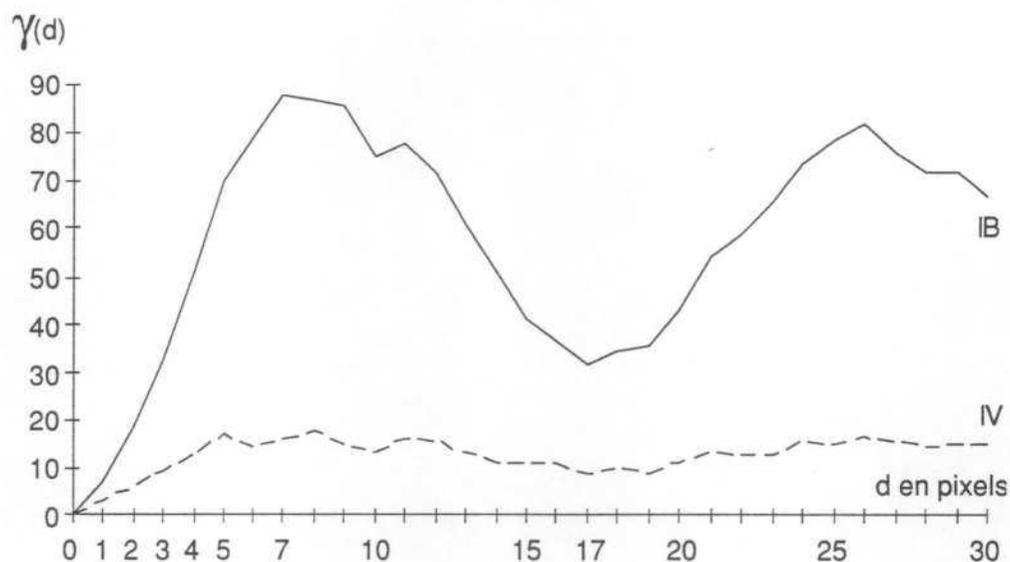
¹DUPLAT 1981 p.206

²MATHERON 1970

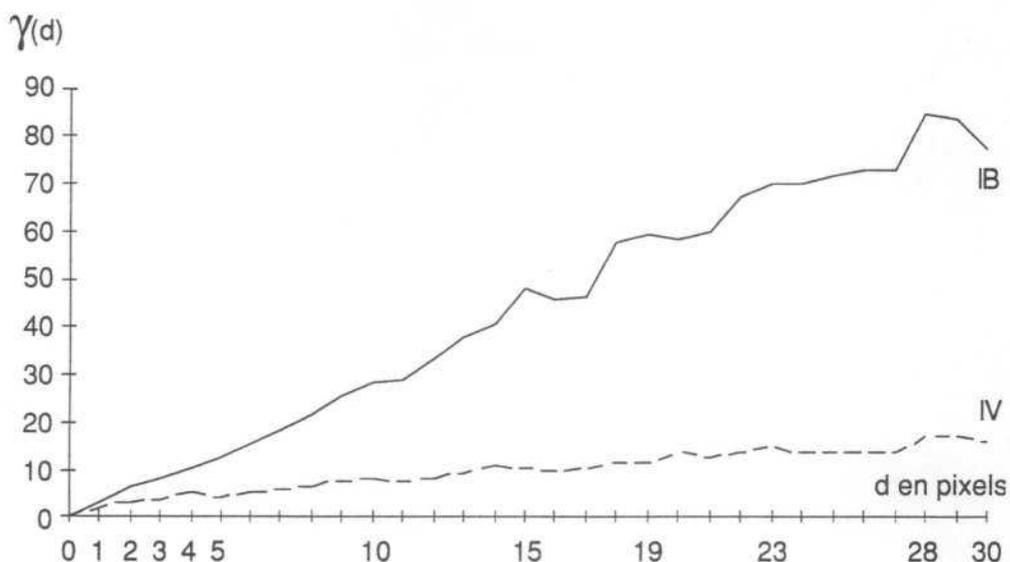
³DUPLAT 1981 p.211

figure 7.7 - Variogrammes d'un secteur dunaire de Rosso

Direction E-W



Direction N-S



Plus la croissance à l'origine est rapide, plus l'influence d'un point sur son voisinage s'estompe rapidement. La corrélation spatiale est donc globalement plus marquée avec l'Indice de Végétation qu'avec l'Indice de Brillance. Cela est dû à la date tardive de prise de vue qui, dans ce secteur, ne rencontre plus que des pailles sénescentes. La courbe de l'Indice de Végétation a de ce fait un comportement très peu contrasté, alors que celle de l'Indice de Brillance a une plus grande dynamique. Celle-ci caractérise mieux les ondulations dunaires.

Que nous apporte la lecture des variogrammes pour la préparation de l'inventaire ? Pour le savoir, il faut analyser chacune des directions puis en réaliser la synthèse. De celle-ci, il ressortira peut être une ou plusieurs distances significatives.

L'interprétation du variogramme se fait de la manière suivante. Dans la mesure où cette étape précède la mission de terrain, il est possible d'utiliser les classifications automatiques comme support d'analyse, même si le contenu thématique de celles-ci nous est plus ou moins inconnu. D'une manière générale, on cherche à localiser sur la classification automatique (cf. fig. 7.2) les ruptures constatées sur les variogrammes (cf. fig. 7.7). Cela permet de déterminer les distances significatives pour l'inventaire, même si l'on ne sait pas ce qui thématiquement justifie l'accroissement de l'hétérogénéité.

L'analyse du variogramme E-W indique qu'un point tiré au hasard, dans un creux interdunaire par exemple ($d=0$), correspond fréquemment à un espace recouvert par une végétation à dominante herbacée et sénescente en raison de la date de prise de vue (6 nov. 1987 pour Rosso). Cent quarante mètres plus loin ($d=7$), après une forte croissance (pour l'Indice de Brillance), le variogramme enregistre un palier. C'est la "**portée**", ou distance à l'origine, de ce phénomène. La variance est ici maximale, nous sommes sur un sommet dunaire relativement décapé. Deux cents mètres plus loin ($d=17$), soit à 340 m de l'origine, l'écart en valeur spectrale avec le point origine a fortement décru, surtout pour l'Indice de Brillance, car selon notre hypothèse de départ nous sommes de nouveau dans un creux interdunaire, etc.. Les emboîtements de structures sont donc ici plus perceptibles avec l'Indice de Brillance à cause de la date de prise de vue.

Notons qu'une hypothèse de départ différente, sommet dunaire par exemple (en $d=0$), présenterait les mêmes résultats. Cette hypothèse est émise pour faciliter la compréhension du variogramme. Elle n'a aucune influence sur celui-ci.

Le variogramme N-S apporte une information sur la dépendance radiométrique des pixels parallèlement aux ondulations dunaires. Il est assez complexe à analyser. En effet, si pour la direction E-W, quasi perpendiculaire aux ondulations, on retrouve facilement le paysage et les distances marquantes, il n'en est pas de même pour celle-ci car différents emboîtements de structures viennent en compliquer la lecture.

On remarque toutefois que de l'origine à une distance de 15 pixels, soit 300 m, la courbe est faiblement mais régulièrement croissante. Cela signifie qu'il y a une forte ressemblance des valeurs spectrales sur cet axe et cela pour des distances assez importantes ; plus la pente est faible et plus la corrélation est forte. Au-delà, la croissance reste la même, mais la progression est plus hachée, des interférences interviennent.

L'interprétation peut en être la suivante. Sur cet axe N-S, il y a peu de changements de thèmes, ou tout du moins ils ne se font pas à distance régulière comme sur l'axe E-W. On n'a donc pas à craindre d'organisation micro-structurale (cf. 6.1.2.2.) contrairement à l'axe E-W.

Pour que le variogramme s'intègre à notre problématique, deux types d'information doivent pouvoir en être extraits, il s'agit soit de la taille des parcelles d'observation et des segments, soit de la périodicité du cycle de l'organisation structurale.

R.G. Congalton¹ indique qu'au-dessus de 10 pixels (Landsat TM), l'apport d'informations est très faible dans un groupe d'initialisation ou de contrôle des traitements. Dans notre exemple le maximum d'informations est recueilli sur 7 pixels (direction E-W). Dans cette direction, l'ordre de grandeur est comparable, malgré la diversité des milieux (prairie nord-américaine contre steppe sahélienne) et des capteurs. Au-delà, l'autocorrélation spatiale reprend pour un temps (le variogramme est décroissant) avant d'aborder la deuxième dune représentée. La direction N-S n'apporte aucun élément de réponse car bien que de pente faible, signe de dépendance spatiale, la courbe est toujours croissante sur la distance étudiée.

En fonction de l'analyse des variogrammes de ce secteur dunaire, quelle est la taille optimale de la parcelle d'observation ? Sur un axe E-W, on constate que sur les sept premiers pixels, la dépendance spatiale décroît rapidement. Il est donc important pour ne pas avoir des parcelles trop hétérogènes que celles-ci soient étroites et parallèles à l'axe des dunes. En effet, nous avons vu que sur l'axe N-S la corrélation spatiale est plus forte, donc que l'homogénéité radiométrique, et par voie de conséquence thématique, est plus durable. Cependant, cette analyse ne permet pas de déterminer la taille des parcelles. L'analyse de la classification automatique se révèle plus efficace que le variogramme pour cet aspect.

Pour ce qui est de l'organisation structurale du paysage, nous avons vu que sur l'axe E-W, l'Indice de Brillance est sensible à la périodicité dunaire, celle-ci est d'environ 340 m. Bien que l'Indice de végétation y soit lui peu sensible, il est important de tenir compte de cette périodicité pour la répartition des segments. Qu'en-est-il du segment d'enquête de 600 mètres de côté utilisé lors de l'inventaire ?

L'incidence de la périodicité semble faible pour cette taille de segment, car celui-ci englobe pratiquement deux périodes complètes et ce, quelle que soit sa localisation sur les ondulations. Il y aurait eu un risque d'interférence si la taille du segment avait été inférieure à celle de la périodicité des

¹CONGALTON 1988 p.599

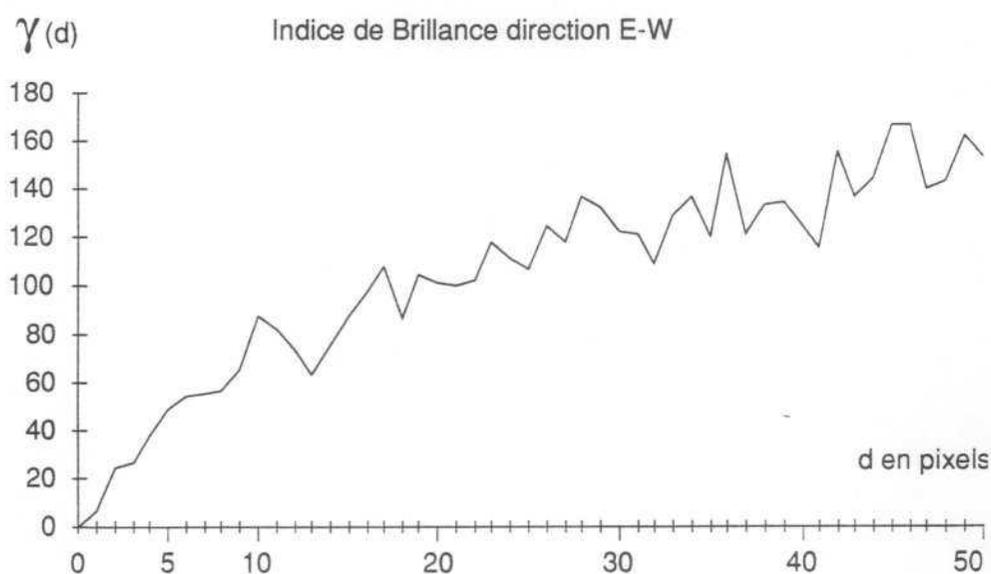
ondulations, voire inférieure à une demi-période, surtout en cas de tirage systématique aligné, les autres tirages y étant normalement moins sensibles.

Notons qu'il semble tout à fait possible de choisir un segment dont la taille correspond à celle de la période. En effet, tous les faciès de l'ondulation dunaire seront représentés, dont les deux versants opposés.

L'analyse variographique a donc permis sur cette petite fenêtre de constater l'existence d'un phénomène par ailleurs visible à l'œil et de mesurer son influence sur la taille des segments d'enquête. S'il ne semble pas qu'elle permette de déterminer la taille des parcelles d'observation, en revanche elle indique les tailles de segment à éviter et si l'on prend des risques en cas de tirage systématique. Qu'en-est-il lorsque l'on étudie l'ensemble d'une zone pilote ?

L'étude du variogramme calculé sur l'ensemble de la zone pilote se révèle plus complexe. A. Dauphiné et Ch. Voiron-Canicio¹ précisent que le variogramme global correspond au cumul des variogrammes élémentaires. Il est donc délicat à utiliser, dans notre cas, pour déterminer la taille de l'aire d'investigation, voire du segment. En effet, nos zones d'études ont été sélectionnées pour leur hétérogénéité, hétérogénéité nécessaire pour tester certains aspects de cette recherche, mais facteur de complexité pour les variogrammes. Les quelques exemples suivants nous le démontrent.

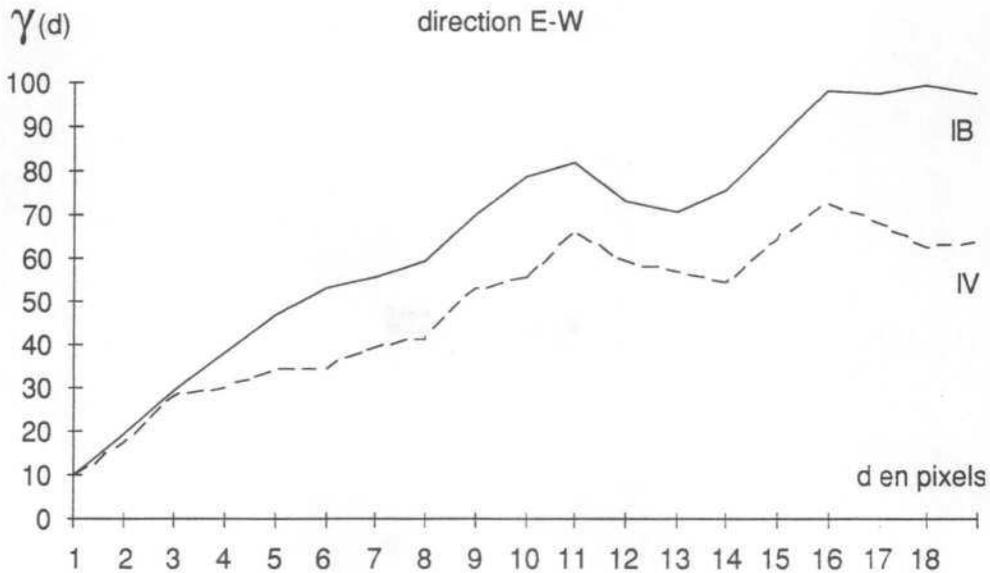
figure 7.8 - Variogramme global non lissé (zone pilote de Rosso)



¹DAUPHINE 1988 p.44

Le variogramme expérimental global est de plus en plus "bruité" avec l'accroissement de la distance "d" (cf. fig. 7.8), mais il est pratiquement toujours acceptable d'ajuster ce variogramme expérimental au variogramme théorique¹. L'ajustement retenu est un lissage par moyenne mobile avec une fenêtre glissante de valeur trois (cf. fig. 7.9). Sur cette figure, les deux courbes ont un comportement proche. Elles nous signalent deux structures emboîtées à une distance de 220 m (d=11) et 320 m (d=16). Contrairement au variogramme élémentaire, il n'y a pas d'explication immédiate. Est-ce un cumul de phénomènes ou un artefact de calcul ? Nous avons probablement ici une des limites de la variographie : il est difficile, voire impossible, d'étudier ensemble plusieurs milieux de texture et/ou de structure différente.

figure 7.9 - Variogramme global lissé (zone pilote de Rosso)



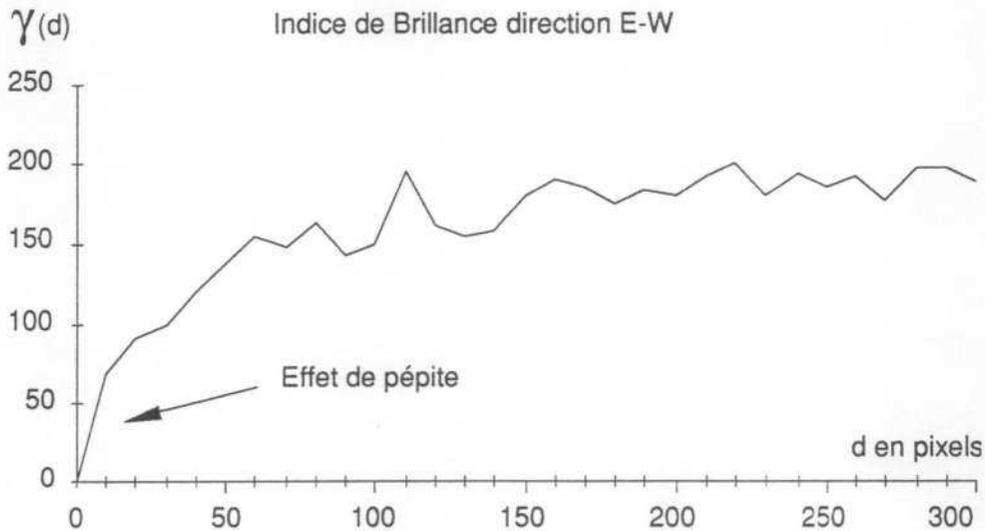
La modification du pas de calcul de "d" permet d'analyser en un temps plus réduit l'ensemble du champ d'étude. Or, on obtient un artefact de calcul, comme sur l'exemple présenté où le pas est de dix (cf. fig. 7.10). L'artefact, ou "**effet de pépité**" se traduit par une pente très forte de la courbe à l'origine. Il signifie que le pas de calcul n'est pas approprié. L'avancement de nos travaux ne nous permet pas de dire si le reste de la courbe est exploitable. Pour l'analyse des structures de grande taille, le recours à l'étude du spectre de la série, ou transformée de Fourier, reste conseillé².

¹DAUPHINE 1988 p.16

²DAUPHINE 1988 p.16

Dans la mesure où nous n'avons pas décelé de périodicité pour les zones pilotes de Lekseïba et des oasis, leur résultats n'ont pas été présentés ici. Seule la zone pilote de Rosso présentait des résultats intéressants vis-à-vis de l'analyse variographique.

figure 7.10 - Variogramme calculé avec un pas de 10 (zone pilote de Rosso)



En conclusion, l'analyse variographique semble surtout pouvoir être utilisée pour rechercher les phénomènes de périodicité. Lorsque ceux-ci sont mis en évidence, il est alors possible d'adapter la taille du segment pour qu'il n'y ait pas d'interférence entre celle-ci et la période.

D'après les expérimentations que nous avons réalisées, il apparaît que le variogramme est assez aisé à interpréter sur des milieux homogènes comme des ensembles dunaires et probablement sur du parcellaire agricole. En revanche, sur des milieux naturels hétérogènes comme ceux sur lesquels nous avons travaillé, l'analyse devient très complexe. Il est même probable que certains phénomènes périodiques échappent à l'analyse du chercheur.

Dans ces conditions, et contrairement à l'analyse de formes, nous ne pouvons pas conseiller l'utilisation de cette technique dans notre problématique d'inventaire. Elle peut sans doute s'avérer plus performante dans d'autres conditions, mais sur nos zones pilotes, sauf localement, elle s'est montrée complexe et peu performante.

7.3. LE DEPOUILLEMENT DE L'ENQUETE

Avant de présenter ce qui est normalement destiné aux commanditaires de l'inventaire, les résultats publics en quelque sorte, il est utile d'analyser la partie technique du dépouillement. Nous avons sélectionné deux aspects : le temps d'enquête et l'affectation des thèmes aux pixels.

7.3.1. Le temps d'enquête

Il nous a semblé important d'approfondir cet aspect pour toutes les personnes désireuses d'effectuer un inventaire avec une méthodologie analogue à celle développée dans cette recherche. La contrainte temporelle est bien souvent primordiale, c'est elle qui détermine fréquemment le nombre de segments d'enquête qu'il est possible de réaliser (cf. 6.1.2.1.).

Les résultats concernant le temps d'enquête sont évalués à partir de l'inventaire de contrôle réalisé en mars 1989, car les paramètres concernant le temps d'enquête n'ont que partiellement été consignés lors de la phase de collecte de mars-avril 1988. Seule, l'heure moyenne d'inventaire était notée. A quelques remarques près, il est toutefois possible d'utiliser les résultats de l'inventaire de contrôle dans notre problématique.

En effet, la façon d'aborder le terrain est très proche. Pour la collecte, l'enquêteur recherche à l'intérieur des segments les zones homogènes qui lui sont désignées par la classification automatique préparatoire (cf. 7.1.). Lors de la phase de terrain de contrôle, sont recherchées les parcelles homogènes indiquées non plus par la classification automatique, comme c'était le cas précédemment, mais par celles qui sont issues des classifications supervisées par la précédente mission. Notons que même lorsqu'il y a correspondance entre les deux classifications, il est tout à fait possible de ne pas enquêter deux fois la même parcelle, lors de la collecte et lors du contrôle (cf. *infra*).

Pour obtenir des temps d'enquête représentatifs d'une phase de collecte et non plus d'une phase de contrôle, il faut ajouter aux résultats que nous allons présenter les temps nécessaires à l'inventaire floristique et à la quantification de la biomasse (cf. 3.4.2.). Cet aspect de l'inventaire n'a pas été pris en compte en mars 1989 en raison de l'avancement de la saison.

Rappelons que la description du paysage et de la végétation à cette époque de l'année ne pouvait être que succincte (cf. 3.2. et 5.2.). Il n'y avait pratiquement pas de détermination floristique à faire et à plus forte raison de quantification, le

piétinement et la dent des animaux ont au mois de mars-avril éliminé une bonne partie du couvert herbacé.

Pour accroître leur représentativité, nous avons étudié ensemble les zones pilotes de Rosso et de Lekseiba. Cela permet en théorie de travailler sur un échantillon de 40 segments. Nous verrons en fait que pour certains paramètres, comme le temps de liaison, il faut se contenter d'un nombre d'unités d'enquête inférieur.

Le nombre de parcelles réellement observées est de 134 pour 40 segments. Cela représente en moyenne entre trois et quatre parcelles par segment, en fait pour un risque de 5 p.100 l'estimation du nombre de parcelles est de $3,4 \pm 0,5$ parcelles. Ce nombre est relativement homogène d'un segment à l'autre, avec pour minimum deux et maximum six unités d'observation.

Le nombre des parcelles enquêtées lors de l'inventaire de contrôle est donc compris entre trois et quatre. Il est inférieur à celui des parcelles théoriques indiqué par la classification automatique pour un segment de 36 ha. Pour mémoire, il y a entre neuf et dix aires homogènes de plus de deux hectares (cf. 7.2.1.2.). Cela signifie, comme nous l'indiquions précédemment, qu'il est possible lors de l'inventaire de collecte et de contrôle de ne pas visiter les mêmes parcelles. C'est aussi une des principales différences entre l'inventaire par la méthode des segments en milieu agricole et en milieu naturel (cf. 7.3.2.1.).

En ce qui concerne le temps d'enquête proprement dit, il n'a été calculé que sur 31 segments. En effet, nous ne connaissons des premiers segments de la mission de contrôle de mars 1989 que l'heure moyenne des observations. Ce n'est qu'au cours de cette mission que nous avons systématiquement noté l'heure de début et de fin des opérations, et donc pu aussi déterminer les temps de liaisons nécessaires.

Le temps d'enquête moyen par segment est d'un peu plus d'une demi-heure. C'est-à-dire toujours au risque de 5 p.100, 31 min 45 s \pm 4 min. Ce temps moyen masque une diversité assez importante, car le temps d'inventaire minimum a été de 15 min et le temps maximum de 65 min. Ceci est fonction du nombre et de la proximité des thèmes à inventorier à l'intérieur du segment. Rappelons que ce temps d'enquête ne comprend qu'une description stationnelle du paysage et physionomique de la végétation avec un comptage ligneux quand cela s'impose, il ne comprend pas d'inventaire floristique ni de quantification.

Le temps de liaison a été déterminé sur seulement 20 segments. Les seuls temps de liaison retenus sont ceux qui correspondent à un trajet entre deux segments qui n'est pas interrompu par une pause quelconque (repas, pause nocturne, mais aussi pannes, etc.). Ces temps de liaison sont donc exempts d'incidents. Il est donc

important, lors de la planification d'une mission, de prévoir une marge de sécurité à ce niveau.

Les temps de liaison ont été équivalents au temps d'enquête par segment, soit un peu plus d'une demi-heure (33 min 30 s \pm 8 min 50 s au risque de 5 p.100). Ici aussi de fortes disparités sont masquées par cette moyenne. Le temps de liaison minimum est de cinq minutes et le temps maximum de quatre-vingt-cinq minutes. On appréciera la proximité de certains segments sur une des figures comportant le tracé de ceux-ci (cf. fig. 7.2 ou 7.3). Notons que pour une zone d'étude plus importante le taux de sondage utilisé pourrait être plus faible, il est pour mémoire de 1,7 p.100 dans notre cas. De ce fait et en conservant des segments de 36 ha, le temps de liaison sera plus important si l'on réduit le temps de sondage.

Pour cette étude, le temps d'enquête, comprenant le temps de liaison et celui de l'inventaire d'un segment a été d'environ une heure. Il a été en moyenne contrôlé 2,5 segments par demi-journée, soit cinq segments par jour. En théorie, ces chiffres indiquent que chaque zone pilote a été contrôlée en quatre jours (4 j * 5 seg. = 20 segments). En réalité, six jours ont été nécessaires à Rosso et huit jours à Lekseiba en raison d'incidents mécaniques et d'impératifs de ravitaillement. Ces contretemps sont toujours possibles et donc à prévoir.

Si l'on compare ces chiffres à ceux du paragraphe 6.4.2., on se rend compte qu'il n'y a pas un écart très important entre le temps d'inventaire de collecte (trois segments par jours à raison de trois heures par segment), et ceux de l'inventaire de contrôle (cinq segments par jour et une heure par segment). Cela se justifie, au moins en partie, par l'intensité du travail. Celui-ci est toujours plus intense lors de la collecte qu'au moment du contrôle. On retiendra donc dans un but de planification, pour la collecte trois segments par jour et pour le contrôle cinq.

7.3.2. La fiche d'enquête et le pixel

Nous allons aborder dans ce paragraphe, le dépouillement proprement dit. Il s'agit d'une part de préparer les fiches d'enquête pour une analyse de l'occupation du sol mais aussi d'envisager la procédure pour passer des relevés de terrain aux pixels.

7.3.2.1. Analyse de la fiche d'enquête

Pour obtenir une valorisation optimale de l'enquête de terrain, il faut que chaque thème visité au cours de la mission ait bien été rencontré un nombre de fois suffisant pour qu'il puisse être représenté avec fiabilité sur la cartographie et que l'estimation de sa superficie soit assez précise. La classification automatique

préparatoire a permis avant de partir en mission de localiser et de contrôler qu'un nombre suffisant de "thèmes radiométriques" étaient présents dans les segments (cf. 6.2., 6.3. et 7.1.). Toutefois, seul le terrain permet de renseigner par ses relevés les thèmes effectivement rencontrés. Il faut donc s'assurer de la bonne représentativité de chacun.

Le plus simple est de constituer un tableau croisant les segments d'une part et les thèmes inventoriés d'autre part. Il est possible de réaliser ce tableau au fur et à mesure de la collecte. Il permet de contrôler assez rapidement le nombre d'apparitions respectives de chacun des thèmes.

Cependant, s'il s'avère qu'un des thèmes est insuffisamment représenté, il ne sera pas possible d'apporter de solution à cet état de fait, à moins de refaire un échantillonnage sur d'autres bases. L'unique solution est de regrouper les thèmes dont la fréquence d'apparition est trop faible pour être significative.

Notons, qu'à partir de deux parcelles d'observation concernant un même thème, il est théoriquement possible de calculer l'estimation sans biais de sa superficie au niveau de la zone pilote, ainsi que la variance de cette estimation. Nous devons toutefois ajouter que les deux parcelles ne devront pas être dans le même segment et qu'il ne faut pas s'attendre à une estimation très fiable avec aussi peu d'individus.

Rappelons que pour réaliser une classification satisfaisante du milieu, d'un point de vue occupation du sol, il est nécessaire de scinder en deux son échantillon de parcelles pour avoir d'une part les parcelles d'initialisation et d'autre part celles de contrôle (cf. 4.3.). Il est donc préférable d'avoir plus de deux parcelles d'un même thème. Cet aspect sera traité à la section 8.1..

Dans notre cas, si l'inventaire avait pu se dérouler en fin de saison des pluies, les thèmes n'auraient pas seulement été caractérisés par une description physiographique des paysages et une analyse physionomique de la végétation, mais aussi par des relevés phytosociologiques, des quantifications de biomasse, etc.. Il aurait donc été nécessaire de réaliser des traitements de données sur ces différentes variables. Cela n'a pas été utile dans notre cas, la caractérisation des thèmes a pu être faite visuellement en raison du faible nombre de variables à manipuler.

Cependant, si la typologie est réalisée par analyse de données, par exemple du type AFC pour les relevés phytosociologiques, il faut qu'elle tienne compte du nombre de thèmes qui seront finalement retenus pour la classification et les traitements statistiques. La phase de dépouillement doit intégrer ces contraintes de représentativité.

Le tableau récapitulatif des fiches de terrain indique que l'on a un certain nombre de relevés pour chaque thème. Ces relevés ont été effectués sur des aires

minimales homogènes (cf. 6.3.2.3.). C'est sur ces parcelles "fiables" que l'on va implanter les parcelles d'initialisation et de contrôle, mais les thèmes inventoriés sont plus développés que leur seule implantation au niveau de ces aires. En général, un relevé est effectué sur une surface d'un hectare mais dans une aire homogène dont on ignore l'extension exacte. On ne peut se fier uniquement à la taille de la parcelle issue de la classification automatique.

De plus, un grand nombre de parcelles de moins de deux hectares ont été éliminées des calculs qui ont servi à la détermination de la taille optimale du segment (cf. 7.2.1.2.). Enfin, quelques grandes parcelles homogènes ont été oubliées. Cela est dû au fait que sur le terrain, elles apparaissent comme jointives avec une parcelle déjà enquêtée, alors qu'en fait elles en sont séparées par un secteur différent. Cette différence peut n'être que radiométrique (condition d'humidité différente du sol lors de la prise de vue, etc.), elle échappe alors à l'enquêteur mais non au satellite. La classification préparatoire ne permet pas toujours de saisir sur le terrain cet oubli, car elle est réalisée à partir de données plus anciennes avec peut-être un nombre de classes différent de celles perçues par l'enquêteur. Une grande partie du segment se trouve ainsi sans fiche de relevé. C'est la grande différence avec les inventaires en milieu agricole.

En effet, en milieu agricole, deux spéculations végétales différentes sont assez facilement différenciables sur le terrain. Il n'y a pas ce problème de lisière que l'on rencontre en milieu naturel, où la transition d'une formation à l'autre peut être très douce et rendre compliquée, voire impossible, la détermination des limites de chacune. Il n'est donc pas possible de mesurer directement sur la fiche d'enquête la superficie de chaque thème au niveau du segment. Cette donnée est pourtant indispensable, comment faire ?

Avant de répondre à cette question, nous allons présenter la liste des catégories d'occupation du sol retenue à la fin de cette étape de dépouillement des fiches d'enquête. En effet, l'estimation de la superficie de chaque thème par segment s'effectue une fois cette première synthèse réalisée. Si à la suite de cette phase d'estimation, il s'avérait que certains thèmes ne sont pas assez représentés, des regroupements seraient alors à nouveau opérés. Il semble de toute façon préférable de procéder par étape.

7.3.2.2. *La nomenclature retenue*

Cette description est volontairement succincte, elle se limite à l'énoncé des catégories d'occupation du sol par zone pilote. Son seul but est de rendre compréhensible au lecteur les résultats présentés en utilisant des exemples concrets. Toutefois, celui-ci trouvera en annexe une synthèse de la fiche d'enquête de chacun

des thèmes cités (cf. Annexe 6). Comme nous l'avons déjà signalé, seules les zones pilotes de Rosso et Lekseiba sont décrites ici.

- Zone pilote de Rosso

A l'issue de la phase de dépouillement de l'enquête de terrain, 11 thèmes ont été retenus pour cette zone pilote. Il s'agit des :

Surfaces en eau	Se
Cultures irriguées	Ci
Steppes arbustives hydromorphes	Sah
Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes	Shy
Sols nus sablo-limoneux	Sns
Sols nus argileux	Sna
Sables vifs	Sv
Steppes herbeuses très claires des dunes	Shd
Steppes herbeuses des ensablements et interdunes	Shi
Steppes arbustives des ensablements	Sae
Steppes "boisées" (gommeraies)	Sb

- Zone pilote de Lekseiba

A l'issue de la phase de dépouillement de l'enquête de terrain, neuf thèmes ont été retenus pour cette zone pilote. Il s'agit des :

Surfaces en eau	Se
Prairies aquatiques	Pa
Steppes arbustives hydromorphes	Sah
Steppes arbustives fermées	Saf
Steppes arbustives	Sa

7.3.2.3. Affectation des thèmes aux pixels

En milieu agricole, Ph. Fournier¹ indique que la superficie de chaque parcelle du segment est mesurée à l'aide d'une table à numériser. Celle-ci permet de tracer les limites de la parcelle puis de calculer le nombre de pixels inclus à l'intérieur de ces limites. Seulement, comme nous venons de le faire remarquer, en milieu naturel, il n'y a que rarement des ruptures suffisamment brusques dans le paysage pour qu'elles puissent être tracées avec précision. Le phénomène de lisières bien connu des forestiers ne permet pas ce tracé. Il faut donc trouver une autre méthode d'estimation des superficies à l'intérieur du segment.

Là aussi, nous avons eu recours à une méthode d'estimation par sondage. Chaque segment a été sondé par un tirage systématique non aligné d'une soixantaine de points. Pratiquement, un agrandissement du segment a été affiché à l'écran, puis une grille de points a été superposée aléatoirement face au segment. Sous chaque point le thème présent a été noté.

Une soixantaine de points par segment de 900 pixels (30 pixels de 20 m de côté) représente un taux de sondage d'environ 7 p.100. Lorsqu'un point de sondage ne se situe pas exactement dans une formation reconnue comme homogène sur le terrain, ses caractéristiques spectrales sont analysées, puis il est attribué à son plus proche voisin thématique et/ou radiométrique. De plus, pour limiter les ambiguïtés, on dispose de la fiche de terrain avec le cheminement sur le segment, de la classification préparatoire et de la composition colorée.

Ensuite pour chaque segment et pour chaque thème pris un à un, il est possible de déterminer la proportion d'occupation du sol, la variance de cette proportion et aussi l'intervalle de confiance qui caractérise cette estimation. Cette dernière va servir ensuite à piloter la classification supervisée thème par thème et segment par segment (cf. 8.1.).

Cette méthode s'inspire de celle proposée par Ph. Brion et Ph. Labat² pour l'estimation des superficies à partir des points TER-UTI. Cette estimation passe par le calcul de la proportion du thème recherché par rapport à l'univers des points tirés, dans notre cas le segment. Chaque pixel tiré selon une grille de points est assimilé à une portion de territoire. Les formules utilisées sont les suivantes.

¹FOURNIER 1986 p.26

²BRION 1984 : 68-69

- *Calcul de la proportion du thème k sur le segment z_i*

$$P_{ki} = \frac{n_{ki}}{N_i}$$

où :

P_{ki} proportion d'occupation du sol du thème k dans le segment z_i ;

n_{ki} nombre de pixels du thème k tiré dans le segment z_i ;

N_i nombre total de pixels dans le segment z_i.

Variance de cette proportion :

$$\text{Var}(P_{ki}) = \frac{P_{ki}(1 - P_{ki})}{N_i}$$

c'est le très classique estimateur de la variance d'une proportion. Une fois ces deux estimateurs calculés, il sont convertis en pixels de la façon suivante.

- *Estimation de la superficie du thème k sur le segment z_i*

y_{ki} estime sans biais la surface de k dans z_i :

$$y_{ki} = P_{ki} * S_i$$

S_i est la surface du segment en pixel

$\text{Var}(y_{ki})$ est la variance de cet estimateur :

$$\text{Var}(y_{ki}) = \text{Var}(P_{ki}) * S_i^2$$

- *Précision de l'estimation de superficie*

La précision de l'estimation de superficie est exprimée à l'aide d'un intervalle de confiance au risque de 5 p.100.

$$IC = y_{ki} \pm 2 \sqrt{\frac{\text{Var}(y_{ki})}{N_i}}$$

ou encore :

$$\left[y_{ki} - 2 \sqrt{\frac{\text{Var}(y_{ki})}{N_i}} ; y_{ki} + 2 \sqrt{\frac{\text{Var}(y_{ki})}{N_i}} \right]$$

Ces formules ne prennent pas en compte le caractère systématique de la grille de points. Elles permettent toutefois une approximation rapide de la superficie du thème k . L'estimation de la superficie y_{ki} , exprimée en pixels, est donc la valeur du thème k issue de l'enquête de terrain. C'est à partir de cette valeur que sera calculée l'estimation de cette catégorie d'occupation du sol pour l'ensemble de la zone pilote (cf. 9.1.).

L'intervalle de confiance IC est utilisé pour piloter la classification supervisée au niveau des segments (cf. 8.2.1.). Il fournit la fourchette dans laquelle doit se trouver le résultat de la classification pour qu'il soit considéré comme satisfaisant et que l'on puisse stopper les traitements, cela thème par thème et segment par segment.

Les estimateurs proposés ici ne servent aucunement à déterminer l'occupation du sol de telle ou telle catégorie au niveau de la zone pilote. Leur seule fonction est de déterminer la proportion de chaque thème à l'intérieur de chaque segment. L'estimation des superficies reste déterminée par les formules présentées à la section 4.3.

A la suite du dépouillement, le calcul de la proportion de chacun des thèmes par segment est effectué. A titre d'exemple, nous présentons les calculs relatifs au segment K5D de Lekseiba. La planche photo 6.1 représente un agrandissement de ce segment, de même, il est possible de le localiser sur la figure A.4.1. Quatre thèmes y ont été inventoriés. Il s'agit des steppes arbustives fermées (Saf), des steppes arbustives (Sa), des steppes herbeuses (Sh) et des steppes arbustives denses dégradées (Sad).

La grille de sondage a permis l'analyse de 56 pixels. Parmi ceux-ci, huit ont été affectés à la catégorie des steppes arbustives denses dégradées. La proportion de ce thème est de :

$$P_{ki} = \frac{n_{ki}}{N_i} = \frac{8}{56} = 0,143$$

soit 14,3 p.100 de la surface du segment. La variance de cette proportion est de :

$$\text{Var}(P_{ki}) = \frac{P_{ki}(1 - P_{ki})}{N_i} = \frac{0,143(1 - 0,143)}{56} = 0,0022$$

La surface du segment S_i est de 900 pixels ($30 * 30$). L'enquête de terrain a permis d'estimer la surface des steppes arbustives denses dégradées au niveau du segment Celle-ci est de :

$$y_{ki} = P_{ki} * S_i = 0,143 * 900 = 128,6$$

soit 129 pixels, c'est-à-dire environ 5,2 ha. La variance de cette estimation est de :

$$\text{Var}(y_{ki}) = \text{Var}(P_{ki}) * S_i^2 = 0,0022 * 900^2 = 1771,14$$

L'intervalle de confiance au risque de 5 p.100 indique que l'estimation de superficie est comprise dans la fourchette suivante :

$$\text{IC} = y_{ki} \pm 2 \sqrt{\frac{\text{Var}(y_{ki})}{N_i}} = 128,6 \pm 2 \sqrt{\frac{1771,14}{56}} = 128,6 \pm 11,2$$

soit 129 pixels plus ou moins 11 pixels, c'est-à-dire 5,2 ha plus ou moins 0,45 ha ($\pm 8,6$ p.100).

A l'issue de l'enquête de terrain, on peut donc dire que pour le segment K5D la superficie des steppes arbustives denses dégradées est comprise entre 117 et 140 pixels, soit entre 4,7 ha et 5,6 ha. Pour que la classification supervisée soit la plus satisfaisante possible, il faut que ces résultats soient compris dans la fourchette fournie par l'enquête de terrain. Nous verrons ce qu'il en est à la section 9.1..

Le tableau 7.4 est un exemple de tous les tableaux qui sont réalisés à l'issue du dépouillement. Ils contiennent par segment les paramètres nécessaires à la suite des traitements.

tableau 7.4 - Caractéristiques d'occupation du sol du segment K5D

Sigle	n_i	P_{ki}	$\text{Var}(P_{ki})$	y_{ki}	IC à 5 p.100	CV	$y_{ki}-\text{IC}$	$y_{ki}+\text{IC}$
Saf	17	0,3036	0,0038	273,2	14,8	20,2	258	288
Sa	11	0,1964	0,0028	176,8	12,8	27,0	164	190
Sh	20	0,3571	0,0041	321,4	15,4	17,9	306	337
Sad	8	0,1429	0,0022	128,6	11,2	32,7	117	140

n_i , y_{ki} , IC sont exprimés en pixels, P_{ki} et $\text{Var}(P_{ki})$ sont sans unités et CV en p.100.

En plus des paramètres précédemment décrits, le coefficient de variation (CV) est calculé pour chaque thème. Il permet d'évaluer la précision relative des thèmes les uns par rapport aux autres.

$$\text{CV} = \frac{\sqrt{\text{Var}(y_{ki})}}{y_{ki}} * 100$$

On constate que sur les quatre catégories d'occupation du sol, seules deux ont un CV qui ne dépasse pas 20 p.100. Seuil au-delà duquel on peut considérer que les estimations issues de l'enquête de terrain, toujours au niveau du segment, sont relativement peu précises. Pour descendre en dessous de ce seuil, il faut tirer au moins 17 pixels par thème sur un total de 56. Ce paramètre aura lui aussi son importance dans l'initialisation des traitements.

Pour conclure cet aspect du dépouillement des fiches d'enquête de terrain, nous soulignerons les points suivants. En raison des phénomènes de lisière propres aux formations naturelles, il est difficile de délimiter exactement l'extension des différentes formations végétales enquêtées. **Malgré cela, il existe des solutions rapides et assez précises pour contourner ce problème et fournir par segment et par thème une estimation de superficie fiable et contrôlable.**

Cette estimation est indispensable pour la poursuite des traitements. Elle est assez longue et fastidieuse à obtenir, car il faut procéder au sondage, à l'écran dans notre cas, de l'ensemble des segments. Ce temps d'inventaire vient s'ajouter à celui déjà accumulé sur le terrain. Comme le constate Ph. Fournier¹, *«cette opération en bureau est longue, fastidieuse et sujette à erreur, elle exige sensiblement le même temps de travail que la réalisation de l'enquête sur le terrain dès que l'enquêteur se trouve effectivement sur le segment.»*

Pour 40 segments à raison de 20 à 30 minutes par segment, il faut compter entre 15 et 20 heures pour effectuer le sondage et les calculs. Cet aspect de l'inventaire s'effectue toutefois dans des conditions moins pénibles que sur le terrain où le même nombre de segments est inventorié en un minimum de 10 jours.

Il nous paraît important de conclure ce premier chapitre de résultats sur les points suivants. La réalisation d'une classification automatique préparatoire est un gage de qualité dans la préparation et le dépouillement de l'inventaire.

D'une part dans la préparation, car celle-ci permet d'évaluer avant la mission le nombre de thèmes, encore théorique à ce stade, qui va pouvoir être enquêté et ensuite si ce nombre et la répartition des thèmes sont compatibles avec le plan d'échantillonnage. Enfin, cette classification, par l'analyse de la structure du paysage qu'elle renferme, permet d'ajuster la taille du segment d'enquête à la physionomie de la zone d'étude. D'autre part lors du dépouillement, car celle-ci apporte une aide non négligeable lors du calcul des proportions de chaque thème à l'intérieur du segment.

Nous avons déjà signalé qu'une des contraintes de cette procédure est qu'elle impose en général l'achat de deux séries de données. Si cela est impératif lorsque l'on procède à la quantification des productions de l'année, c'est peut-être moins absolu

¹FOURNIER 1986 p.26

lorsqu'il s'agit d'un inventaire d'occupation du sol qui n'a pas dans ses objectifs l'estimation d'un paramètre très variable d'une année sur l'autre comme le sont les cultures et la biomasse vis-à-vis des précipitations annuelles. Cet aspect sera repris dans l'analyse des résultats proprement dits.

8. LA CARTOGRAPHIE D'OCCUPATION DU SOL

Nous venons de décrire la procédure d'acquisition des données de terrain ainsi que leur dépouillement en vue des traitements cartographiques et statistiques. Ce chapitre va présenter les résultats cartographiques obtenus à l'issue de la mission de terrain. L'obtention de ces résultats se décompose en trois phases. Lors de la phase préparatoire, les paramètres relatifs à l'initialisation des traitements vont être définis, puis les classifications proprement dites vont être réalisées, enfin le contrôle de celles-ci sera présenté.

8.1. RÈGLES D'ANALYSE

Le principal problème auquel on se heurte lorsqu'il s'agit de réaliser la classification des données satellitaires est le choix des parcelles d'initialisation, encore appelées polygones d'entraînement ou zones tests. Sous quels critères doivent-elles être choisies, nombre, taille, etc. ? Nous allons dans un premier temps décrire les caractéristiques de celles dont nous disposons, puis nous évoquerons la procédure de sélection utilisée.

8.1.1. Description des parcelles d'initialisation

Il n'existe pas de règle absolue pour déterminer le nombre et la taille des parcelles d'initialisation nécessaires aux traitements. En fonction des auteurs et de leur terrain de recherches, ces paramètres peuvent être très variables. Certains insistent sur le nombre de pixels par parcelle, d'autres sur le nombre de parcelles, enfin, il en est pour lier les deux.

R. Manière et C. Chamignon¹ utilisent des polygones d'entraînement de 50 pixels. Ph. Fournier et J.P. Gilg² indiquent qu'il n'est pas toujours possible d'avoir une trentaine de parcelles et de satisfaire ainsi à la loi des grands nombres. Dans ce cas, ils préconisent de ne pas descendre en dessous de trois à cinq parcelles d'initialisation et de contrôle. Comme les parcelles d'initialisation et de contrôle sont de préférence distinctes³, il faut donc en avoir au moins six. Les inventaires

¹MANIERE 1986 p.166

²FOURNIER 1985a p.4

³FOURNIER 1985b p.5

régionaux de la CEE¹ ont recours à au moins cinq parcelles "assez éloignées" de 150 pixels chacune.

Il semble donc qu'il faille d'une part un certain nombre de parcelles distinctes et d'autre part que celles-ci soient composées d'une quantité assez importante de pixels. Cependant, dans la mesure où ces études se déroulent sur des milieux différents du nôtre, est-il possible de s'inspirer de leurs résultats pour les zones pilotes de Rosso et Lekseïba ?

Nous avons cherché à savoir combien de parcelles de même taille que celles précédemment citées nous avons sur chacun de nos secteurs. Pour cela, nous avons repris les résultats de l'analyse de formes effectuée sur les classifications automatiques (cf. 7.2.).

Les parcelles de 50 pixels et plus, soit au moins deux hectares, représentent à Rosso 17,4 p.100 de l'ensemble des parcelles de cette zone pilote et à Lekseïba, 22,9 p.100, tandis que les parcelles de 150 pixels et plus, soit au moins six hectares, représentent 4,8 p.100 à Rosso et 4,3 p.100 à Lekseïba. Quelle conclusion peut-on en tirer ?

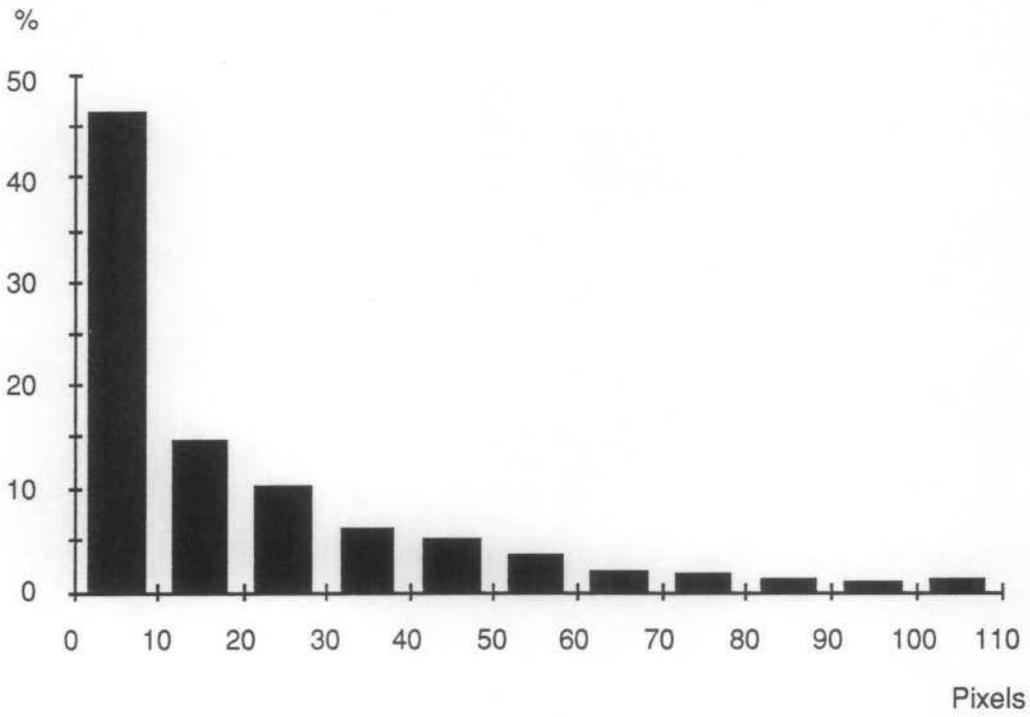
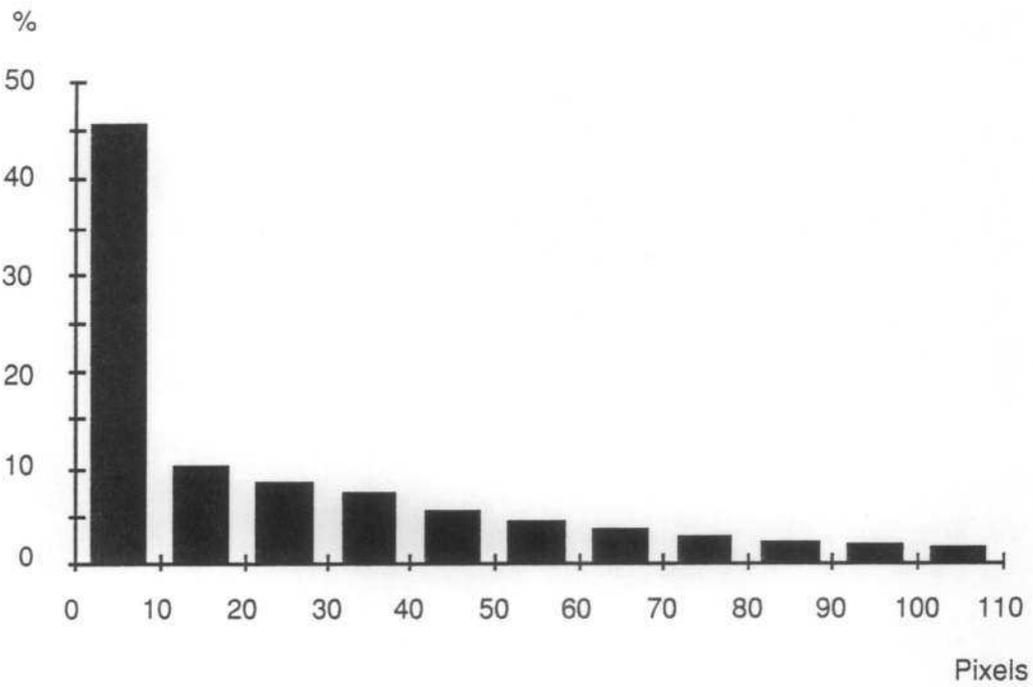
Les parcelles de 150 pixels sont caractéristiques du parcellaire cultivé européen et ne sont pas du tout adaptées au milieu naturel sahélien de nos zones pilotes. Le cas des parcelles de 50 pixels est plus discutable car elles permettent encore de choisir les parcelles d'initialisation parmi 20 p.100 des parcelles restantes. Nous avons cependant estimé que ce seuil était trop élevé et risquait de ne pas permettre la sélection de suffisamment de parcelles dans les segments, surtout pour les thèmes ayant une faible extension spatiale.

Comme on peut le constater sur la figure 8.1, les parcelles les plus nombreuses se situent entre zéro et dix pixels. Elles représentent plus de 45 p.100 de celles-ci sur les deux zones pilotes. La décroissance est ensuite très rapide car sur la classe suivante, elles tombent à 14,6 p.100 à Rosso et 10,1 p.100 à Lekseïba.

En définitive, nous avons opté pour des parcelles d'une taille de neuf pixels, c'est-à-dire la plus petite forme compacte que l'on puisse localiser (cf. 6.3.2.3.). Celle-ci est suffisamment réduite pour qu'un grand nombre de parcelles d'une taille équivalente ou supérieure se rencontrent dans de nombreux segments. Il y a 58,2 p.100 des parcelles à Rosso et 57,2 p. 100 à Lekseïba qui font neuf pixels ou plus. De plus, elle s'inscrit à l'intérieur des unités d'observation et à plus forte raison des aires minimales. De ce fait le risque d'une initialisation des traitements par des données mal localisées est réduit.

¹IAT 1989 p.6

figure 8.1 - Fréquence des parcelles par groupe de tailles

Rosso**Lekseiba**

Comme différents auteurs l'ont noté précédemment (cf. *supra*), il est préférable d'utiliser plusieurs polygones d'entraînement, surtout lorsque ceux-ci ne font que neuf pixels. On a en effet intérêt à se rapprocher de la trentaine de pixels, toutes parcelles confondues, si l'on souhaite atteindre une certaine représentativité radiométrique des thèmes. De plus, la méthode de classification retenue, dite maximum de vraisemblance, s'appuie sur l'hypothèse que les pixels d'entraînement suivent une distribution normale à plusieurs variables¹ (cf. 4.3.2.2.).

Cependant, comme cette recherche a été expérimentée sur des zones pilotes de petite taille, celles-ci ne comportent pas un grand nombre de segments d'enquête. Pour mémoire, elles comportent chacune 20 segments de 36 ha lorsque le taux de sondage est de 1,7 p.100. De ce fait, certains thèmes ont très peu de parcelles d'observation dans lesquelles il est possible d'implanter des polygones d'entraînement.

Nous avons donc été contraint de ne retenir que trois polygones d'entraînement par thème. Toutes les catégories d'occupation du sol ont donc été initialisées avec le même nombre de pixels, soit 27 pixels, même celles qui pouvaient disposer de plus de parcelles tests. De ce fait, nous avons dissocié la qualité des résultats de l'importance numérique de chaque catégorie. Une faible représentation en surface ne doit pas se traduire par une faible représentation radiométrique. Ces deux aspects sont indépendants.

Dans la mesure où il est possible de disposer de plus de segments pour un inventaire, il est préférable d'accroître le nombre de parcelles d'initialisation pour assurer la meilleure représentation radiométrique possible et limiter le biais dans les classifications. Quoi qu'il en soit, il faut s'assurer dès cette étape que l'on dispose bien d'au moins trois parcelles de neuf pixels par thème pour réaliser des traitements significatifs. En dessous, certains thèmes auront des résultats très éloignés de leur étendue réelle en raison du faible nombre de pixels d'initialisation. Il nous faut maintenant envisager de façon pratique l'implantation des parcelles.

8.1.2. Sélection des parcelles d'initialisation

La parcelle homogène qui supporte le polygone d'entraînement doit avoir été enquêtée sur le terrain, c'est-à-dire, non seulement visitée, mais aussi posséder une fiche de relevé sur laquelle sont portées les caractéristiques stationnelles. Ceci paraît être une évidence, mais n'est que rarement respecté car on a souvent trop peu de zones tests. Alors, on s'en fabrique en toute bonne foi sur des souvenirs de terrain.

¹MEYER-ROUX 1981a p.16

La représentativité radiométrique peut s'en trouver biaisée et, sans fiche de terrain, il est impossible d'analyser la justesse de tel ou tel comportement radiométrique.

De même, il n'est théoriquement pas indispensable d'initialiser les traitements avec des polygones d'entraînement inclus dans les segments. Cependant, lorsqu'une parcelle est sélectionnée par l'opérateur hors d'un segment, c'est soit pour son caractère exceptionnel, soit pour son aspect "pseudo-représentatif". Elle est en général une caricature du type physiologique recherché. Cette parcelle a donc toutes les chances d'avoir un comportement radiométrique dont les paramètres de moyenne et de variance ne sont pas représentatifs du thème au niveau de la zone d'étude. L'utilisation d'un tel type de parcelle risque d'entraîner un biais dans les classifications et donc par extension dans les statistiques d'occupation du sol. Il est à notre sens à proscrire, car il y a déjà suffisamment d'erreurs d'observation à commettre à l'intérieur des segments pour ne pas aller en chercher ailleurs.

Il reste à choisir et à implanter les polygones d'entraînement à l'intérieur du segment. Il est logique d'implanter ceux-ci à l'intérieur des aires homogènes. Une implantation en leur centre limitera les phénomènes de bordures et leur influence sur la radiométrie du polygone.

Pratiquement, chacun des trois polygones d'entraînement a été matérialisé à l'intérieur d'une parcelle observée sur le terrain. Pour accroître la variabilité radiométrique du thème, ces trois polygones ont toujours été implantés dans trois segments différents. Les polygones sont des petits carrés de trois pixels de côté. L'initialisation est donc effectuée sur 27 pixels, soit un peu plus d'un hectare.

L'implantation de ces polygones aurait été grandement facilitée si, lors de cette phase, nous avions disposé des classifications automatiques. Rappelons que cette recherche a été menée ultérieurement à la publication des résultats d'inventaire. Cette procédure n'est pas nouvelle car dès 1981, J. Meyer-Roux¹ a eu recours à cette technique pour localiser ses parcelles d'initialisation.

Quoi qu'il en soit, il peut être intéressant de vérifier que les différents thèmes issus des relevés de terrain couvrent bien, non seulement les différentes catégories d'occupation du sol mais aussi l'ensemble du spectre des radiométries en présence. Nous avons choisi une méthode de contrôle visuel qui permet de voir le comportement des parcelles d'initialisation entre elles et vis-à-vis du nuage radiométrique. Cette méthode emprunte à l'histogramme bidimensionnel son nuage et lui superpose les parcelles d'initialisation (cf. fig. 8.2 et 8.3).

¹MEYER-ROUX 1981b p.15

La procédure est la suivante. Dans un premier temps, il faut sélectionner les canaux les plus décorrélés deux à deux pour l'ensemble des thèmes. Il s'agit logiquement des deux premiers facteurs de l'analyse en composantes principales. Notons toutefois que, lors de la réalisation du projet d'inventaire, nous ne les avons pas utilisés en raison de leur complexité d'interprétation. Nous avons préféré travailler sur les canaux origines et les néo-canaux IV et IB.

Dans la mesure où pour illustrer cette recherche nous avons repris les résultats des traitements cartographiques publiés dans le rapport d'inventaire¹, les canaux retenus sont les plus décorrélés après les deux premières composantes principales. Dans le cas de Rosso, les deux canaux retenus sont XS3 et XS1, leur coefficient de corrélation est de 0,18. Pour Lekseiba, il s'agit de XS3 et IV avec un coefficient de -0,26. Il est bien sûr possible de compléter cette analyse en combinant d'autres canaux d'intérêt majeur pour l'étude.

tableau 8.1 - Paramètres de classification calculés sur les parcelles d'initialisation (zone pilote de Rosso)

Thèmes	Sigles	Barycentres		Ecart types	
		XS3	XS1	XS3	XS1
Surfaces en eau	Se	55,2	82,9	1,9	1,1
Cultures irriguées	Ci	92,0	48,9	5,6	3,1
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	77,0	64,6	2,5	2,5
St. herbeuses très claires des dépr. hydro.	Shy	79,1	75,0	12,1	4,7
Sols nus sablo-limoneux	Sns	94,0	83,0	2,9	4,2
Sols nus argileux	Sna	105,4	97,0	3,7	1,7
Sables vifs	Sv	112,8	76,4	2,5	1,5
St. herbeuses très claires des dunes	Shd	105,7	75,2	3,8	1,7
St. herb. des ensablements et interdunes	Shi	96,7	73,7	2,6	3,1
St. arbustives des ensablements	Sae	87,0	68,1	3,3	3,8
Steppes "boisées" gommeraias	Sb	83,9	62,1	1,5	1,5
Ensemble du fichier		96,7	77,9	11,5	8,3

Résultats exprimés en niveaux de luminance ($W/m^2/strd$)

L'étape suivante consiste, à partir des canaux précédemment retenus, à réaliser d'une part un histogramme bidimensionnel pour chaque zone pilote et d'autre part, à calculer la moyenne et la variance de chacun des thèmes sur les trois polygones pour fournir les paramètres radiométriques des catégories d'occupation du

¹DE WISPELAERE 1989

sol. Ces paramètres sont ensuite représentés sur l'histogramme. L'ensemble est appelé graphe bidimensionnel et permet de voir l'adéquation entre l'ensemble des radiométries de l'image et le résumé fourni par les relevés de terrain. Ces graphes sont réalisables sur tous les canaux pris deux à deux, mais les plus intéressants concernent les canaux les plus décorrélés, car sur les autres l'information est trop contractée.

On trouvera dans le tableau 8.1 les paramètres radiométriques calculés sur les parcelles d'initialisation des différents thèmes de Rosso et dans le tableau 8.2, ceux de Lekseiba. Ils représentent le profil radiométrique moyen de chacune des catégories d'occupation du sol. Dans la mesure où l'on associe le nuage de points général, tous thèmes confondus, à un hyper-ellipsoïde (nuage à n dimensions), les moyennes représentent les coordonnées du barycentre du thème pour les canaux considérés et les écarts-types sont les demi-axes de l'ellipsoïde marquant les limites du thème dans l'espace radiométrique.

tableau 8.2 - Paramètres de classification calculés sur les parcelles d'initialisation (zone pilote de Lekseiba)

		Barycentres		Ecart types	
Thèmes	Sigles	XS3	IV	XS3	IV
Surfaces en eau	Se	56,3	113,3	2,9	3,4
Prairies aquatiques	Pa	59,3	154,8	8,2	10,2
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	68,4	162,3	3,4	4,3
Steppes arbustives fermées	Saf	81,5	172,4	1,9	4,4
Steppes arbustives	Sa	82,7	138,1	5,1	4,3
Steppes herbeuses	Sh	88,8	128,4	4,4	2,1
Steppes arbustives denses dégradées	Sad	91,5	123,2	3,1	3,0
Sols nus	Sn	91,6	115,2	5,2	2,7
Affleurements rocheux	Af	65,6	134,1	3,8	4,8
Ensemble du fichier		83,3	128,3	12,1	12,8

Résultats exprimés en niveaux de luminance ($W/m^2/strd$)

La consultation des figures 8.2 et 8.3 nous renseigne sur deux aspects importants de l'inventaire. Elles permettent d'une part d'évaluer très rapidement les risques de confusions radiométriques liés à un chevauchement des thèmes sur l'histogramme bidimensionnel et d'autre part, elles nous informent, d'une manière détournée, sur la représentativité de l'échantillonnage.

En effet, si sur l'histogramme des deux canaux les plus décorrélés, deux thèmes voient leurs ellipses se chevaucher, pour espérer les séparer, il est impératif de trouver une autre combinaison de canaux où ce chevauchement n'existe pas. Cette

combinaison sera d'autant plus dure à trouver que la corrélation augmente et que par conséquent les possibilités de discrimination diminuent.

Nous avons constaté ce phénomène pour Rosso (cf. fig. 8.2) entre les Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy) et les Steppes arbustives des ensablements (Sae). Bien que ce phénomène ne soit pas trop marqué, il nous a toutefois contraint à réaliser les traitements sous masques pour séparer ces deux thèmes. Sur aucun des canaux retenus pour les traitements, XS3, XS1 et IV (cf. 8.2.), la discrimination de ces deux thèmes n'était satisfaisante. Pour Lekseïba (cf. fig. 8.3), le même phénomène se produit entre le thème Prairie aquatique (Pa) et le thème Steppes arbustives hydromorphes (Sah).

Le problème des chevauchements radiométriques dépend en grande partie de la qualité radiométrique de l'image satellite. Une mauvaise date de prise de vue augmente le chevauchement des ellipses.

A l'opposé du chevauchement, il existe des "vides" plus ou moins importants entre les différentes parcelles d'initialisation. Nous parlons bien sûr de l'intérieur du nuage matérialisant la zone pilote d'un point de vue radiométrique sur le graphe. L'importance de ces lacunes renseigne sur la pertinence de l'échantillonnage. De petits vides entre les parcelles d'une part et entre les parcelles et les limites du nuage d'autre part, indiquent une bonne répartition des thèmes dans l'espace radiométrique. On a probablement atteint la description la plus fine. En revanche, si des lacunes importantes existent dans la répartition des parcelles, il est probable que des thèmes n'ont pas été identifiés.

La consultation des deux figures nous indique que "l'échantillonnage radiométrique" est incomplet. En effet, sur la figure 8.2 il existe une zone assez importante dans les basses valeurs de XS1 et XS3 (toujours à l'intérieur du nuage) qui ne comporte pas de parcelle d'initialisation. La même constatation est effectuée sur la figure 8.3, mais elle concerne plus particulièrement les basses valeurs de XS3.

Dans les deux cas, il est possible d'attribuer ce secteur non représenté à des catégories liées au thème eau. En effet, celui-ci est particulièrement polymorphe en raison de sa charge en limon, sa profondeur, etc.. Son comportement radiométrique est donc très variable. Il couvre un très large spectre. De ce fait, un échantillonnage un peu "léger" ne permet pas d'en attraper toutes les nuances radiométriques. Ceci va poser quelques problèmes lors des classifications (cf. 8.2.).

Il est donc possible de supposer que les autres lacunes constatées sont autant de thèmes radiométriques potentiels que l'enquête n'a pas identifiés sur le terrain. Reste à savoir s'il est possible de les discriminer sur le terrain et s'il est important d'introduire des nuances dont on aura du mal à justifier la véracité.

figure 8.2 - Graphe bidimensionnel (zone pilote de Rosso)

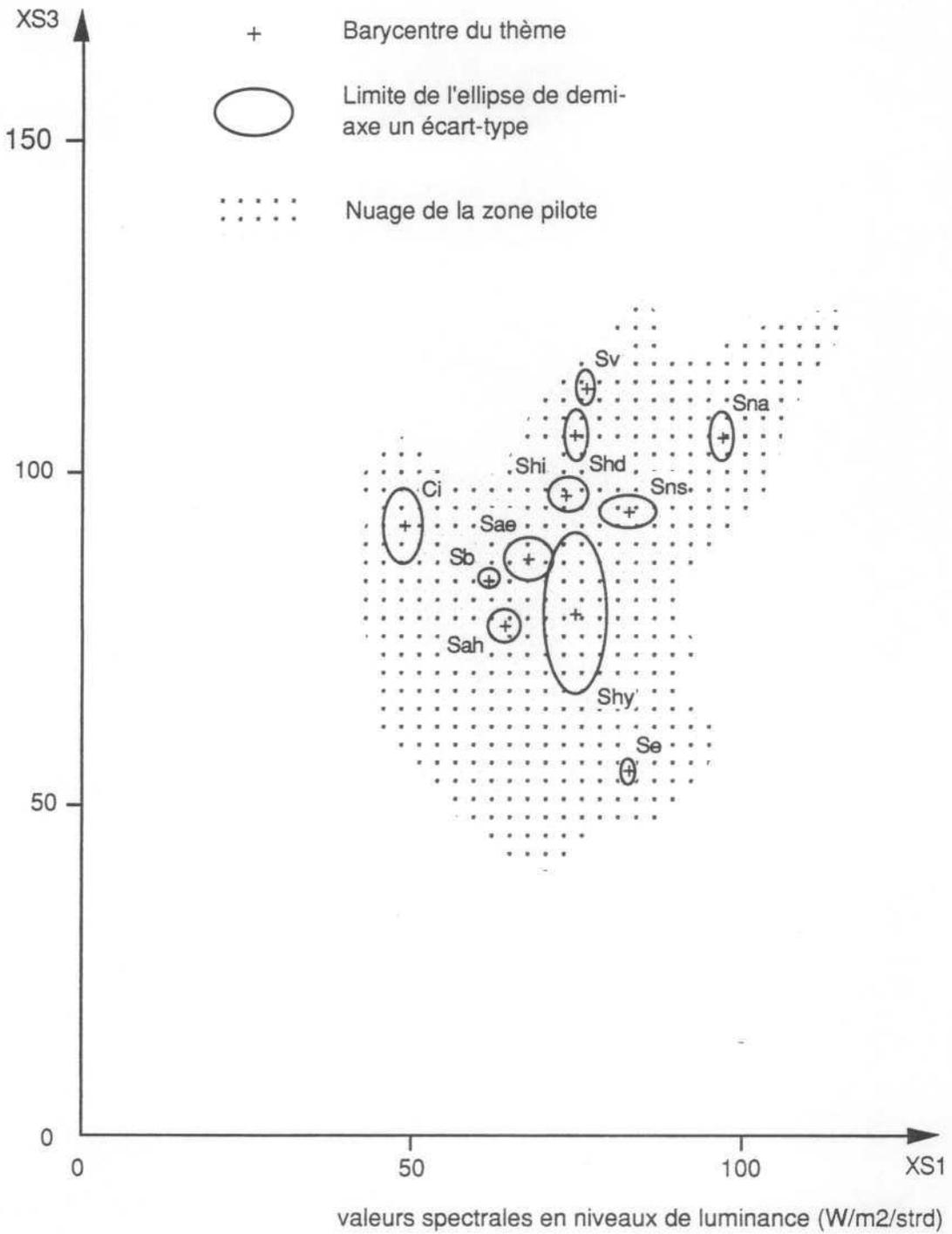
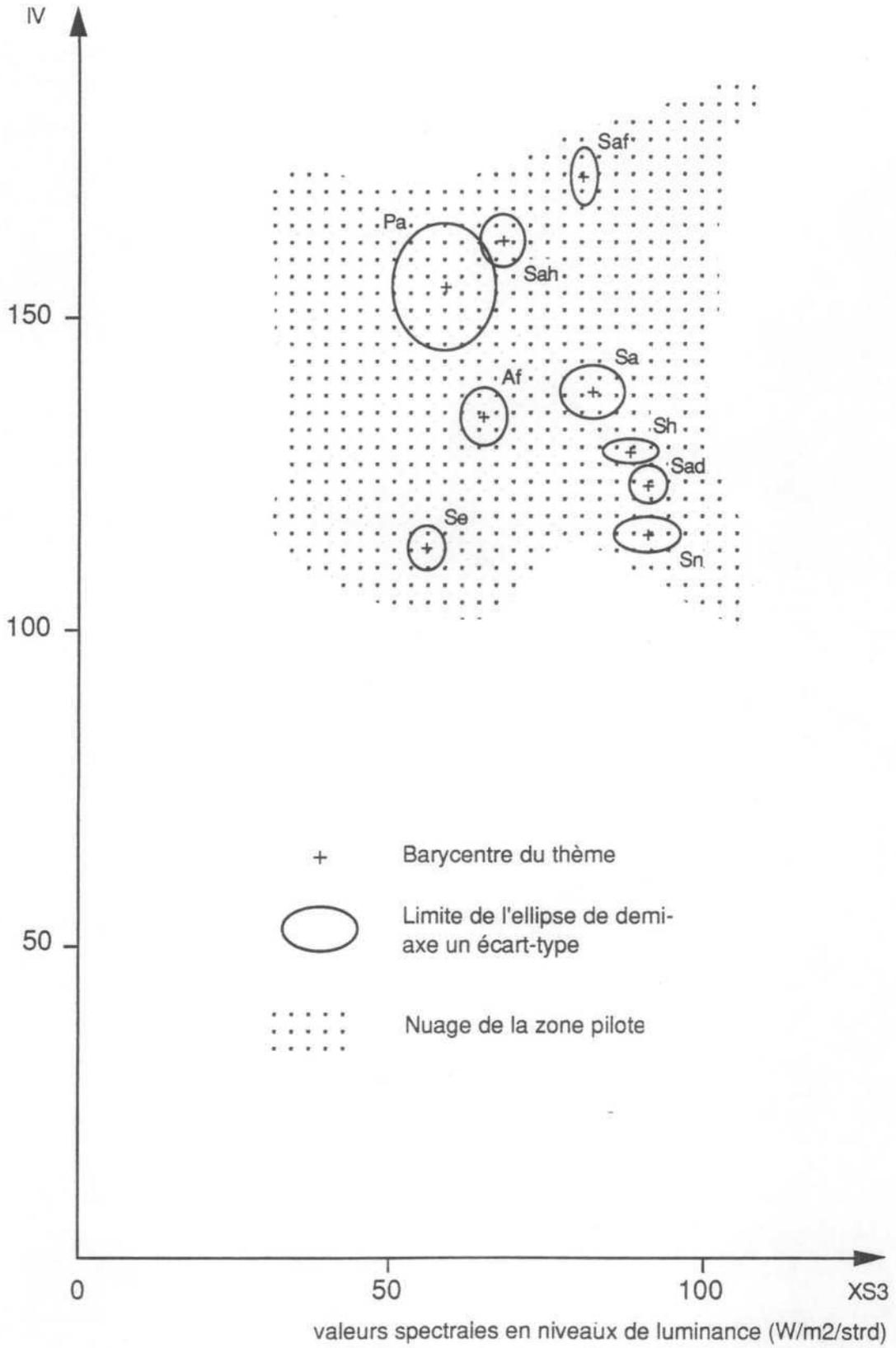


figure 8.3 - Graphe bidimensionnel (zone pilote de Lekseiba)



A ce sujet, l'hypertrophie de certains thèmes comme les Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy) (cf. fig. 8.2) ou les Prairies aquatiques (Pa) (cf. fig. 8.3) est due au regroupement de plusieurs thèmes proches dont on ne pouvait assurer une bonne représentativité individuelle. En effet, le manque d'individus dans l'échantillon nous a contraint à les regrouper à l'intérieur d'une même catégorie. La typologie en est moins fine mais la représentativité plus fiable. La taille de ces parcelles est donc liée à l'augmentation de la variance de cette nouvelle catégorie.

En conclusion, les graphes bidimensionnels sont une aide importante dans la préparation des traitements. Ils permettent d'affiner le choix des parcelles d'initialisation surtout lorsque celles-ci sont nombreuses. Ce n'était, hélas, pas notre cas, d'où les lacunes constatées dans l'occupation de l'espace radiométrique. Dans le cadre d'un inventaire opérationnel, avec une soixantaine de segments pour un milieu relativement homogène et un taux de sondage de 0,5 à 1 p.100 (cf. 6.4.2.), il est probable que l'on tende vers une meilleure répartition des parcelles d'initialisation dans l'espace radiométrique.

Lorsque le choix des parcelles d'initialisation est arrêté, c'est-à-dire après plusieurs essais pour sélectionner les "bonnes" parcelles, il est possible de passer à la phase de classification proprement dite.

8.2. DE LA CLASSIFICATION À LA CARTE

Toutes les classifications dont il a été question jusqu'à présent étaient destinées à préparer l'inventaire et non à être publiées. Cette présente section relate les procédures mises en place pour réaliser les classifications qui doivent normalement déboucher sur les cartographies d'occupation du sol comme définies au point 4.3.1.4..

Le traitement cartographique se divise en deux étapes successives. La première permet de déterminer les paramètres de classification au niveau du segment par confrontation avec les données de terrain acquises sur ces mêmes unités d'enquête. La deuxième procède à la classification sur l'ensemble de la zone pilote à l'aide des paramètres précédemment étalonnés sur les segments.

8.2.1. Étalonnage au niveau des segments

Nous avons vu précédemment que deux informations sont collectées au niveau des segments : d'une part la proportion d'occupation du sol de chaque thème (cf. 7.3.2.3.) et d'autre part, la moyenne et la variance de chaque parcelle d'initialisation puis, par agrégation, de chaque thème (cf. 8.1.2.).

Les classifications sont réalisées par la méthode du maximum de vraisemblance dont la procédure a déjà été décrite (cf. 4.3.2.2. et 7.1.1.2.). Elle porte pour les zones pilotes sur les canaux XS3, IV et XS1, les plus décorrelés après les composantes principales. Contrairement au protocole mis en place pour les classifications automatiques préparatoires (cf. 7.1.1.2.), les paramètres de moyenne et de variance sont ici calculés sur les parcelles d'initialisations et non à partir de noyaux radiométriquement stables comme dans le cas des nuées dynamiques. La classification est donc supervisée par les informations collectées sur le terrain.

De même, alors que pour les classifications automatiques il n'était pas question d'intervenir dans le déroulement des traitements (sur quel critère ?), dans le cas des classifications supervisées, il est possible d'ajuster le résultat en fonction d'un seuil d'attraction paramétrable. Ce seuil est un seuil de classification qui détermine si un pixel appartient à un ellipsoïde ou s'il en est exclu. Le chercheur choisit un seuil de probabilité qui détermine le seuil de classification¹.

La procédure de classification est la suivante. La première opération consiste à masquer toutes les parties du fichier numérique qui sont en dehors des segments. Il y a deux raisons à cela. Premièrement, on ne connaît la proportion d'occupation du sol qu'à l'intérieur des segments. Deuxièmement, les classifications tournent plus vite sur un petit fichier.

Dans un deuxième temps, les seuils de classification sont calculés. Dans notre cas, pour le premier essai, tous les seuils ont reçu la même valeur dans la mesure où le seuil de probabilité était le même pour tous, à savoir 0,95.

A l'issue du premier essai, on compare thème par thème et segment par segment les résultats de la classification à ceux de l'estimation de la proportion d'occupation du sol issu du terrain. Rappelons que l'estimation de l'occupation du sol présentée au point 7.3.2.3. est assortie d'un intervalle de confiance qui est présenté sous la forme d'une fourchette encadrant l'estimation de superficie, toujours thème par thème et segment par segment. Ceci facilite le pilotage de la classification.

¹NUMELEC 1987 p. VI-14-1

figure 8.4 - Carte d'occupation du sol de Rosso

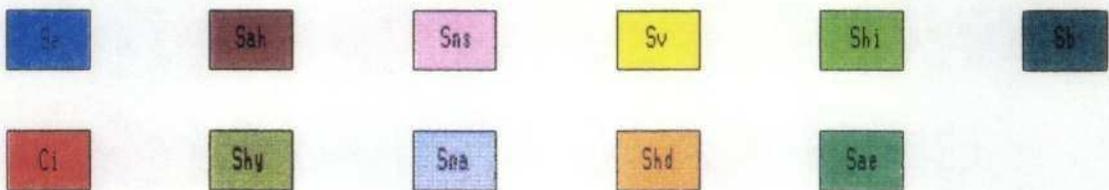
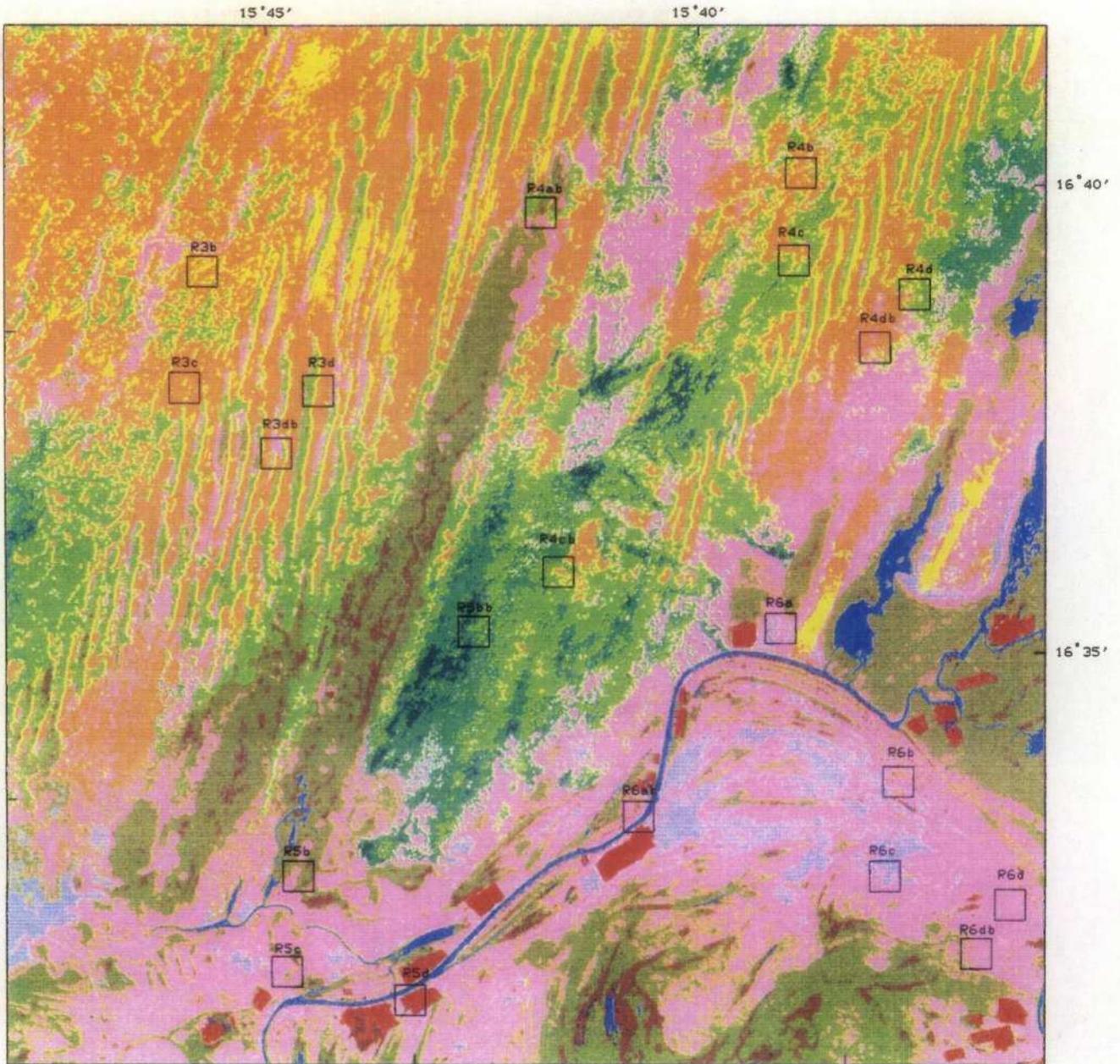
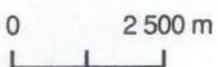
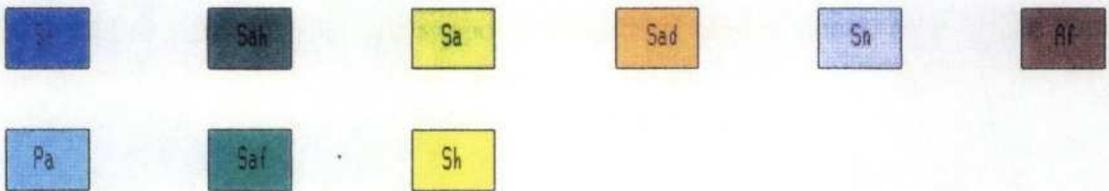
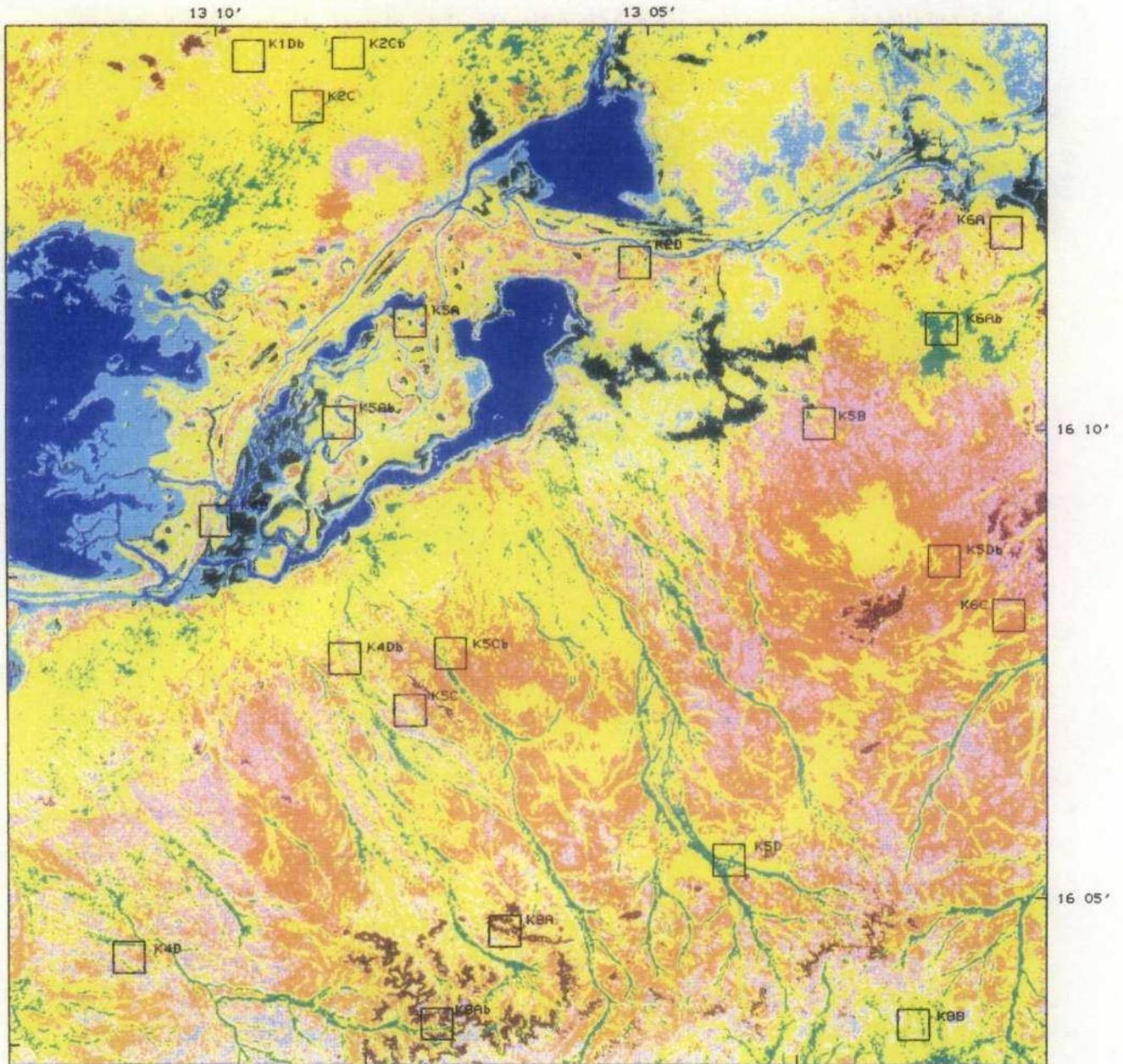


figure 8.5 - Carte d'occupation du sol de Lekseiba



Ensuite, en fonction des résultats successifs des classifications, les seuils sont ajustés empiriquement thème par thème jusqu'à l'obtention d'un résultat global satisfaisant. Le résultat est jugé satisfaisant lorsque la majorité des résultats de classification est comprise dans la fourchette déterminée par l'enquête de terrain.

Notons que, prise thème par thème et segment par segment, la correspondance entre le terrain et la classification n'est pas toujours excellente (cf. Annexe 7). Il est même localement possible de constater des variations allant du simple au double. Cependant, à un niveau global, et c'est là l'intérêt de la télédétection associée à cette méthode d'inventaire, la relation entre le terrain et la classification est souvent très bonne. Cet aspect sera développé au paragraphe 9.1.2..

Quoi qu'il en soit, une fois la classification au niveau des segments jugée satisfaisante, les paramètres ainsi déterminés sont stockés puis appliqués au fichier complet de la zone pilote. Ce sont les résultats que nous allons présenter maintenant.

8.2.2. Extrapolation à la zone pilote

Il est possible de considérer qu'à ce stade des travaux, la procédure de classification n'est plus qu'une formalité dont le but est de fournir la cartographie et les statistiques d'occupation du sol au niveau de l'ensemble de la zone pilote. C'est bien à notre sens une formalité, car l'intervention du chercheur devient très minime. Il n'est en effet plus question de toucher aux paramètres de classification dans la mesure où l'on n'a pas de connaissances du terrain en dehors des segments.

On se contente toutefois de "boucher les trous", car l'échantillon n'est pas représentatif de toutes les situations radiométriques, en particulier en ce qui concerne l'eau comme nous l'avons vu précédemment (cf. 8.1.2.). Cette étape doit être menée avec précaution car l'affectation des pixels non classés est ici très subjective en raison de l'absence de contrôle de terrain. Dans notre cas, elle porte sur 0,10 p.100 des pixels de Rosso, soit environ 40 ha sur 40 000 et 0,13 p.100 des pixels de Lekseiba, soit environ 50 ha sur 40 000.

En pratique, les pixels non classés sont éliminés lorsque le seuil d'attractivité de la classe à laquelle ils sont supposés appartenir est augmenté. Notons que cette opération de "bouchage de trous" peut être presque nulle si l'échantillon est plus étoffé, ce qui est normalement le cas lors d'un inventaire opérationnel.

A l'issue de la classification, deux types de résultats sont acquis. Il s'agit d'une part des résultats chiffrés des classifications au niveau du segment et de la zone

pilote. Ceux-ci vont être utilisés pour calculer les estimations de superficie à l'aide de l'estimateur par la régression dont les résultats sont présentés au paragraphe 9.1.2..

D'autre part, il est bien sûr possible à l'issue de l'étape de classification de proposer les résultats cartographiques proprement dits, à savoir, la carte d'occupation du sol de Rosso (cf. fig. 8.4) et celle de Lekseiba (cf. fig. 8.5). Les deux documents reproduits ici au 1/100 000 ont été publiés à l'origine au 1/50 000 dans le cadre du rapport d'inventaire¹.

Comme cela a été justifié au 4.3.2.3., tout document cartographique doit être accompagné d'une appréciation objective de sa qualité relationnelle. C'est cet aspect qui va être abordé à présent.

8.3. ÉVALUATION DES RÉSULTATS

Le document cartographique permet de visualiser la répartition des différents postes d'occupation du sol, ainsi que leur importance relative. C'est donc une documentation indispensable dont il convient d'apprécier la validité. Nous verrons dans un premier temps quelles sont les méthodes de contrôle existantes et parmi celles-ci, celle qui nous semble la plus adaptée. Puis, la procédure de contrôle retenue sera décrite.

8.3.1. Quels contrôles ?

S'il est maintenant acquis que la validité du document cartographique doit être contrôlée, il reste à en définir les modalités. Il convient tout d'abord de déterminer les éléments sur lesquels doit porter le contrôle des classifications puis, ensuite, quelle doit être son "intensité".

Il nous semble indispensable de rappeler ici que le contrôle ne peut s'effectuer que sur des éléments dont on a une très bonne connaissance, c'est-à-dire des relevés de terrain fiables. Dans notre cas et comme pour la phase d'initialisation, seuls les segments d'enquête remplissent cette condition.

N'est-il pas dangereux de recourir aux segments en amont et en aval des traitements ? En effet, si l'on contrôle les classifications avec ce qui a servi à les initialiser, il y a un fort risque d'autovalidation des résultats. Comment peut-on contourner cette contrainte ?

¹DE WISPELAERE 1989

Normalement, lorsqu'il y a suffisamment de segments, l'échantillon est scindé en deux, une partie sert à l'initialisation l'autre au contrôle, ce qui est particulièrement valable en phase opérationnelle, lorsqu'il y a suffisamment de segments. Il est fréquent qu'à défaut de segments ce soient les parcelles d'observation que l'on scinde en deux. Dans notre cas, dans la mesure où nous n'avons pas beaucoup de segments, tous ont servi de support à la procédure de contrôle, même ceux qui portaient déjà des parcelles d'initialisation. Quel est le risque d'autovalidation dans ce cas-là ?

Ce risque reste à notre sens très modéré dans la mesure où la quantité de pixels d'initialisation est très faible. A titre d'exemple, pour la zone pilote de Rosso, à raison de 11 thèmes et 27 pixels d'entraînement par thème, 297 pixels ont effectivement servi à initialiser les traitements. Cela représente 1,7 p.100 des pixels pouvant être contrôlés. Les 20 segments totalisent 18 000 pixels (20 * 900 pixels). Pour Lekseiba, le risque d'autovalidation ne porte que sur 1,4 p.100 des pixels, c'est-à-dire 9 thèmes de 27 pixels pour 20 segments de 900 pixels.

Comme on peut le voir, même avec un petit nombre de segments, le risque de biais dans le contrôle reste modéré. Nous avons donc eu recours aux mêmes segments pour initialiser et valider les classifications. Nous acceptons que l'on nous en fasse le reproche. Cependant, si l'on ne peut utiliser un double lot de segments, existe-t-il un autre mode de contrôle ?

Nous avons pensé à moment donné utiliser un document extérieur à l'inventaire comme vérité terrain, le but étant de s'affranchir du segment comme base de contrôle. Tout naturellement, nous nous sommes tourné vers les photographies aériennes, mais mise à part l'impossibilité de s'en procurer de récentes (cf. 4.1.), leur utilisation s'avère un mode de contrôle compliqué.

En effet, pour que le contrôle puisse s'effectuer, il faut que l'image classée et la photo (ou tout autre document) soient superposables point par point. Cela implique une épreuve de scannage ou de numérisation, un assemblage, une mise en géométrie, etc., c'est-à-dire beaucoup de travail de préparation avant le contrôle proprement dit. A notre sens, le risque d'autovalidation encouru par notre méthode ne justifie pas que l'on se lance dans des manipulations aussi lourdes.

Le segment reste donc l'unité de référence quelle que soit la phase d'inventaire. C'est donc à partir de celui-ci que le contrôle s'effectue. Nous allons voir comment.

8.3.2. Évaluation des classifications

La méthode retenue est la suivante. Il s'agit de tirer un certain nombre de points dont on relève l'affectation sur le terrain et sur la classification. Tous ces points sont stockés dans un tableau que l'on appelle matrice de confusion, à partir de laquelle différents indices peuvent être calculés (cf. 4.3.2.3.).

8.3.2.1. Les matrices de confusion

Pratiquement, le tirage de ces points s'effectue par sondage systématique non aligné sur le Péricolor. L'image classée et le document qui a servi de support d'enquête sont superposés à l'écran puis, à l'aide d'une grille, une cinquantaine de points par segment sont contrôlés. Bien que l'on ne réenquête pas les mêmes points, c'est la même manipulation que celle décrite pour déterminer la proportion d'occupation de chaque thème au niveau du segment (cf. 7.3.2.3.).

Notons que dans l'état actuel de nos travaux, il est indispensable de sonder deux fois chaque segment, une première fois pour déterminer la proportion d'occupation du sol, avant l'initialisation, une deuxième fois pour effectuer le contrôle de la classification. En effet, dans la mesure où il n'est pas possible de matérialiser comme pour le parcellaire agricole les limites des entités thématiques, à chaque nouvelle analyse du paysage, un nouveau sondage doit être effectué. Cet aspect est fastidieux et semble difficilement automatisable.

Deux procédures de sondage ont été réalisées. Dans le premier cas, mis en pratique sur Rosso, nous avons cherché à n'enquêter qu'une trentaine de points par thème, donc 330 pixels contrôlés pour 11 thèmes. Pour cela nous avons stratifié les segments et nous avons sondé les strates en fonction de leur variabilité. Ceci avait pour but de limiter le nombre de points à sonder tout en assurant une bonne répartition des pixels de contrôle aux thèmes. Comme nous allons le voir plus loin (cf. *infra*), cet objectif n'est que partiellement atteint.

Dans le second cas, mis en pratique sur Lekseïba, la procédure de sondage est plus simple mais le tirage des points plus lourd. Cette procédure est identique à celle décrite pour l'évaluation de la proportion d'occupation du sol, c'est-à-dire : tirage systématique non aligné d'une cinquantaine de points, par segment, sans se préoccuper de la représentativité des thèmes. Nous allons comparer les résultats obtenus à l'issue de ces tirages. Pour cela, nous allons commencer par analyser les matrices de confusion dans lesquelles sont stockés les résultats du sondage.

Rappelons que la matrice de confusion se présente sous la forme d'un tableau à double entrée où sont lus horizontalement les thèmes reconnus sur le terrain et

verticalement les thèmes classés dans l'image. Comme cela a été défini au point 4.3.2.3., une forte concentration de points sur la diagonale signifie que la classification est fidèle à l'enquête de terrain. Par opposition, une somme en ligne (ΣT) nettement supérieure au total de la diagonale signifie que l'on est en présence d'une erreur par omission, le thème est sous-représenté sur la carte. Tandis qu'une somme en colonne (ΣC) nettement supérieure au total de la diagonale indique une erreur par commission et donc que la carte sur-représente le thème considéré.

tableau 8.3 - Matrice de confusion (zone pilote de Rosso)

		C	L	A	S	S	I	F	I	C	A	T	I	O	N
		Se	Ci	Sah	Shy	Sns	Sna	Sv	Shd	Shi	Sae	Sb	ΣT		
T E R R A I N	Se	44													44
	Ci		12												12
	Sah			5	1										6
	Shy				56	1									57
	Sns					5	70	4				1			80
	Sna					2	1	15							18
	Sv								6						6
	Shd						2		2	37	6				47
	Shi				7					1	37	8			53
Sae											2	3		5	
Sb												2		2	
ΣC		44	12	5	71	74	19	8	38	43	11	5	330		

ΣC : nombre total de points contrôlés sur l'image classée par thème

ΣT : nombre total de points contrôlés sur le terrain par thème

Surfaces en eau (Se), Cultures irriguées (Ci), Steppes arbustives hydromorphes (Sah), Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy), Sols nus sablo-limoneux (Sns), Sols nus argileux (Sna), Sables vifs (Sv), Steppes herbeuses très claires des dunes (Shd), Steppes herbeuses des ensablements et interdunes (Shi), Steppes arbustives des ensablements (Sae), Steppes "boisées" (gommerais) (Sb).

A titre d'exemple, les Sols nus argileux (Sna) ont été contrôlés sur les documents de terrain à raison de 18 individus dans un échantillon de 330 (colonne ΣT). Sur ces 18 points, 15 sont cartographiés comme tels, deux en Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy) et un en Sols nus sablo-limoneux (Sns).

Sur les 19 points classés en Sols nus argileux (Sna) (ligne ΣC), 15 avaient été identifiés comme tels sur le terrain, mais quatre viennent des Sols nus sablo-

limoneux (Sns). Ce thème est relativement bien appréhendé. La dispersion de part et d'autre de la diagonale est limitée mais sa représentation numérique est faible.

Si l'appréciation de la qualité de la classification peut être affinée par l'utilisation d'indices spécifiques (cf. *infra*), la lecture de la matrice de confusion nous renseigne sur un aspect essentiel de l'évaluation, c'est-à-dire l'importance numérique des points contrôlés pour chaque thème.

tableau 8.4 - Matrice de confusion (zone pilote de Lekseiba)

		C	L	A	S	S	I	F	I	C	A	T	I	O	N	
		Se	Pa	Sah	Saf	Sa	Sh	Sad	Sn	Af	ΣT					
T E R R A I N	Se	15	2													17
	Pa		33				1									34
	Sah			1	14											15
	Saf					65										65
	Sa			2		4	200	20					2			228
	Sh			3			7	251	8	5						274
	Sad			1				4	215	5	2					227
	Sn								13	136	1					150
	Af										47					47
ΣC		15	42	14	69	207	276	236	146	52	1057					

ΣC : nombre total de points contrôlés sur l'image classée par thème

ΣT : nombre total de points contrôlés sur le terrain par thème

Surfaces en eau (Se), Prairies aquatiques (Pa), Steppes arbustives hydromorphes (Sah), Steppes arbustives fermées (Saf), Steppes arbustives (Sa), Steppes herbeuses (Sh), Steppes arbustives denses dégradées (Sad), Sols nus (Sn), Affleurements rocheux (Af)

En dessous d'un certain nombre de points de contrôle par thème, la qualité de la cartographie n'est donnée qu'à titre indicatif. La représentativité du thème dans l'échantillon de contrôle est insuffisante pour que les indices soient significatifs.

Pour Rosso sont concernés les thèmes suivants : Cultures irriguées (Ci), Steppes arbustives hydromorphes (Sah), Sols nus argileux (Sna), Sables vifs (Sv), Steppes arbustives des ensablements (Sae), Steppes "boisées" (gommeraies) (Sb). Tandis que pour Lekseiba, seules les Surfaces en eau (Se) et les Steppes arbustives hydromorphes (Sah) ont moins de 30 points de contrôle.

En conclusion, il ressort de cette analyse des matrices de confusion et de leur comparaison qu'il ne faut pas hésiter à tirer un grand nombre de points de contrôle.

Les thèmes dominants dans le paysage seront certainement sur-représentés, mais c'est la seule façon de ne pas rejeter les catégories de faible superficie. De même, un échantillonnage élevé par segment, entre 5 et 9 p.100 à Lekseiba, assure une meilleure représentativité des petits thèmes que les essais de tirages stratifiés tentés sur Rosso.

8.3.2.2. Indices de précision

La précision globale Pg des classifications, telle qu'elle a été définie au point 4.3.2.3. (somme des éléments diagonaux divisée par le total des points enquêtés, le tout ramené en pour cent), est de 86,7 p.100 à Rosso $[(286 / 330) * 100]$ et de 92,3 p.100 à Lekseiba $[(976 / 1 057) * 100]$. L'imprécision globale des classifications est donc d'environ 10 p.100 sur les deux zones pilotes. Nous allons essayer thème par thème de relever les taxons responsables de ces ambiguïtés.

tableau 8.5 - Précision des différents estimateurs (zone pilote de Rosso)

Sigles	MA	Préc. thématique	Préc. cartog.
Se	100	100	100
Ci *	100	100	100
Sah *	90,9	83,8	100
Shy	87,5	98,3	78,9
Sns	90,9	87,5	94,6
Sna *	81,1	83,3	79,0
Sv *	85,7	100	75,0
Shd	87,1	78,7	97,4
Shi	77,1	69,8	86,1
Sae *	25,0	40,0	18,2
Sb *	57,1	100	40,0

Résultats en pour cent

MA : indice de Hellden

Surfaces en eau (Se), Cultures irriguées (Ci), Steppes arbustives hydromorphes (Sah), Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy), Sols nus sablo-limoneux (Sns), Sols nus argileux (Sna), Sables vifs (Sv), Steppes herbeuses très claires des dunes (Shd), Steppes herbeuses des ensablements et interdunes (Shi), Steppes arbustives des ensablements (Sae), Steppes "boisées" (gommeraies) (Sb).

Les thèmes dont la représentativité est insuffisante (cf. tab. 8.4 et 8.5) sont annotés d'un astérisque (*). La validité des résultats est appréciée par la lecture des indices. L'origine des ambiguïtés et des erreurs de classification est à rechercher dans

la matrice de confusion. Le formulaire de ces différents indices est exposé au point 4.3.2.3..

Si l'on reprend à titre d'exemple les Sols nus argileux (Sna) de Rosso (cf. tab. 8.5), la précision statistique, évaluée par l'indice de Hellden (MA), est satisfaisante car supérieure à 80 p.100. La relation terrain carte pour ce thème n'est toutefois pas excellente car la classification a tendance à surévaluer l'importance des Sols nus argileux (Sna).

En effet, si l'on se reporte à la matrice de confusion (cf. tab. 8.3), on constate que quatre des 19 pixels contrôlés sur les documents de terrain en Sols nus sablo-limoneux (Sns) ont été classés Sols nus argileux (Sna). Cela se traduit par une précision cartographique (Pc) de seulement 79 p.100. En revanche, avec un score de 83,3 p.100, la précision thématique est meilleure car seulement trois des 18 pixels contrôlés en Sols nus argileux (Sna) ont été classés différemment, deux en Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy) et un en Sols nus sablo-limoneux (Sns).

tableau 8.6 - Précision des différents estimateurs (zone pilote de Lekseiba)

Sigles	MA	Préc. thématique	Préc. cartog.
Se *	93,8	88,2	100
Pa	86,8	97,1	78,6
Sah *	96,6	93,3	100
Saf	97,0	100	94,2
Sa	92,0	87,7	96,6
Sh	91,3	91,6	90,9
Sad	92,9	94,7	91,1
Sn	91,9	90,7	93,9
Af	95,0	100	90,4

Résultats en pour cent.

MA : indice de Hellden

Surfaces en eau (Se), Prairies aquatiques (Pa), Steppes arbustives hydromorphes (Sah), Steppes arbustives fermées (Saf), Steppes arbustives (Sa), Steppes herbeuses (Sh), Steppes arbustives denses dégradées (Sad), Sols nus (Sn), Affleurements rocheux (Af).

L'étude des scores d'indices regroupés dans les tableaux 8.5 et 8.6 permet d'une part une étude fine des points faibles et des points forts de chaque thème. De plus, lorsqu'un problème de classification est repéré, il est possible en retournant vers les matrices de confusion d'en connaître l'origine et donc d'en tenir compte dans l'analyse du paysage.

D'autre part, ces tableaux permettent une étude synthétique et rapide de la validité des classifications. Seront retenues comme fiables les classifications dotées d'au moins vingt à trente points de contrôle (cf. matrices de confusion) et dont tous les indices seront supérieurs à un certain seuil.

Aux États-Unis, l'USGS¹ a retenu un seuil d'acceptabilité minimum de 85 p.100, pour des milieux sur lesquels il existe déjà une documentation il est vrai. Lors des simulations SPOT sur le Lauragais², les auteurs ont considéré que pour des territoires ne disposant pas de statistiques fiables, une imprécision de 25 p.100 est la caractéristique d'un outil précieux, le seuil minimum est donc de 75 p.100. Nous allons retenir ces deux seuils pour évaluer les résultats cartographiques de l'inventaire.

Pour Rosso, trois thèmes ont une précision globale supérieure à 85 p.100. Par globale on entend, pour l'indice de Hellden, la précision thématique et la précision cartographique. Il s'agit des Surfaces en eau (Se), Cultures irriguées (Ci) et Sols nus sablo-limoneux (Sns). Cinq thèmes ont une précision globale comprise entre 75 et 85 p.100, ce sont les Steppes arbustives hydromorphes (Sah), Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy), Sols nus argileux (Sna), Sables vifs (Sv) et Steppes herbeuses très claires des dunes (Shd). Il y a donc huit thèmes sur les onze qui ont une précision globale satisfaisante.

Notons toutefois que sur ces huit thèmes, quatre ont un échantillon de contrôle un peu faible (cf. tab. 8.3). Il s'agit des Cultures irriguées (Ci), Steppes arbustives hydromorphes (Sah) et Sables vifs (Sv). Leur résultat est donné à titre indicatif.

En revanche, trois thèmes ont une fiabilité plus douteuse à Rosso. Ce sont les Steppes herbeuses des ensablements et interdunes (Shi), Steppes arbustives des ensablements (Sae) et Steppes "boisées" (gommériaies) (Sb). Si les deux derniers thèmes sont insuffisamment représentés pour que leur résultats soient fiables, il n'en va pas de même avec les Steppes herbeuses des ensablements et interdunes (Shi) dont l'enquête de contrôle a relevé 53 individus sur le terrain et 43 sur la classification.

Ce thème est porteur de grosses ambiguïtés radiométriques. Il a capté six points des Steppes herbeuses très claires des dunes (Shd) et en a perdu sept au profit des Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy) et huit à celui des Steppes arbustives des ensablements (Sae). Cette constatation se retrouve dans les résultats par segment présentés en Annexe 7.

¹FITZPATRICK-LINS 1981 p.343

²GDTA 1984 p.35

En toute rigueur et avec du recul, il aurait été logique de procéder à des regroupements thématiques. La sous-représentation numérique de certains thèmes associés à leur instabilité radiométrique ne justifie pas réellement de les conserver indépendants. Mais, comme c'est le cas pour de nombreux travaux, les regroupements pourtant indispensables ne sont pas tous effectués et cela dans le but de ne pas trop appauvrir la diversité visuelle de la cartographie.

Pour Lekseiba, huit thèmes sur neuf ont une précision globale supérieure à 85 p.100. Il s'agit des Surfaces en eau (Se), Steppes arbustives hydromorphes (Sah), Steppes arbustives fermées (Saf), Steppes arbustives (Sa), Steppes herbeuses (Sh), Steppes arbustives denses dégradées (Sad), Sols nus (Sn), Affleurements rocheux (Af). Le neuvième thème, les Prairies aquatiques (Pa), présente une précision globale comprise entre 75 et 85 p.100. Il n'y a pas de problème particulier de représentation numérique au sein de l'échantillon de contrôle (cf. tab. 8.4), sauf pour les Surfaces en eau (Se) et les Steppes arbustives hydromorphes (Sah).

D'une manière générale, la classification de Lekseiba offre des résultats bien meilleurs que celle de Rosso, même si ceux de cette dernière sont acceptables. De plus, elle comporte peu de problèmes de représentativité numérique au niveau du contrôle des thèmes, car le taux de sondage sur les segments est plus important à Lekseiba qu'à Rosso, 5,9 p.100 contre 1,8 p.100, et le nombre de thèmes classés est plus faible à Lekseiba qu'à Rosso.

En revanche, il n'est pas possible de dire qu'il y a plus de problèmes de représentativité à Rosso qu'à Lekseiba en raison d'un nombre plus important de petits thèmes à Rosso. L'idée que les thèmes seraient d'autant mieux contrôlés qu'ils ont une surface plus importante souffre de nombreuses exceptions. Il suffit entre autres de comparer le comportement des Surfaces en eau (Se) et des Affleurements rocheux (Af) de la matrice de Lekseiba aux résultats statistiques du tableau 9.4 pour s'en convaincre.

De même, la meilleure qualité des résultats cartographiques de Lekseiba est aussi probablement liée à un problème de répartition des précipitations. A Rosso, les thèmes concernés par la végétation de diéris sont ceux pour lesquels l'ambiguïté radiométrique est la plus forte. Avec une date de prise de vue du 6 novembre 1987, un mois après les dernières pluies utiles (cf. 2.2.2.1. et tableaux décennaires Annexe 3), l'image satellite relate pour ces thèmes des stades de dessiccation plus ou moins avancés et hétérogènes, d'où les "migrations" radiométriques d'un thème à l'autre. Ce problème ne semble pas se poser à Lekseiba en raison de précipitations plus abondantes et plus étalées qu'à Rosso, alors que la prise de vue, bien que plus précoce

(12 octobre 1987) est là aussi située un mois après les dernières pluies utiles (cf. Annexe 3).

Enfin, la procédure de traitement a été mise au point sur la zone pilote de Rosso. Ceci peut avoir influencé la différence de qualité entre les résultats des deux secteurs d'étude.

En conclusion de ce chapitre consacré aux aspects cartographiques de l'inventaire, il semble important de souligner les points suivants. Dans les traitements cartographiques, la phase d'initialisation des classifications est très importante. Elle conditionne toute la chaîne des traitements. De ce fait, on aimerait connaître des recettes pour réussir une bonne initialisation, mais existent-elles ?

Il semble que chacun se débrouille avec une bonne dose de pragmatisme sans toujours justifier le bien-fondé de la taille de ses parcelles ni le nombre de pixels retenus pour l'initialisation. De ce fait, il nous a semblé préférable de reprendre les résultats de l'analyse de formes (cf. 7.2.) et d'y rechercher la ou les classes pour lesquelles le nombre de parcelles est le plus important. C'est logiquement cette classe qui doit être la mieux répartie sur l'ensemble des segments.

Dans notre cas, il y a en moyenne plus de 40 p.100 des parcelles qui font moins de 10 pixels. Il faut donc initialiser avec des parcelles de moins de 10 ha pour être sûr d'en trouver dans tous les segments de la zone pilote, pour pratiquement tous les thèmes.

Pour avoir un nombre suffisant de pixels d'entraînement, il faut donc plusieurs parcelles d'initialisation. Nous en avons retenu trois par thème de neuf pixels chacune, soit 27 pixels pour chaque thème.

Nous avons conscience qu'une meilleure représentation radiométrique est souhaitable. Cependant cette recherche a été menée dans un cadre expérimental, sur de petits secteurs d'étude. En mode opérationnel, et avec un nombre de segments plus important, le nombre de parcelles d'initialisation pourra être nettement supérieur et satisfaire à l'hypothèse de travail (cf. 8.1.1.) selon laquelle les pixels d'entraînement suivent une distribution normale à plusieurs variables¹. De même, elle permettra de séparer les parcelles d'initialisation de celles de contrôle.

En effet, pour cette étude, le faible nombre d'unités d'enquête nous a contraint à ne pas différencier les segments dans lesquels les tirages d'initialisation et de contrôle sont effectués. Bien que, comme nous l'avons démontré, le risque

¹MEYER-ROUX 1981a p.16

d'autovalidation soit faible, nous pensons à l'instar de nombreux auteurs qu'il serait plus prudent de se dégager complètement de ce risque en séparant les populations d'initialisation de celles de contrôle.

Malgré ce souhait, nous n'avons pas eu recours à des moyens de contrôle extérieurs. D'une part il n'existe aucune documentation récente, photographique ou autre (cf. 4.1.), sur les zones pilotes, d'autre part la mise en concordance de cette documentation et du document à contrôler est très complexe. Ce surcroît de complexité est-il justifié par les résultats de la méthode pratiquée ?

Nous ne le pensons pas dans la mesure où, au risque d'autovalidation près, les résultats du contrôle des classifications sont satisfaisants. En effet, celles-ci répondent aux impératifs de rigueur qui sont attendus d'un document cartographique, à l'exception toutefois de trois thèmes steppiques du diéris de Rosso : que ce soit pour la visualisation de la répartition des différentes catégories d'occupation du sol ou pour l'obtention des superficies indispensables au calcul de l'estimation par la régression.

Enfin, nous ne présentons pas ici de cartographie des pâturages car les méthodes d'inventaire que nous préconisons n'ont pu être mises en pratique en fin de saison des pluies. Nous ne disposons donc pas des données indispensables à la réalisation de ce type de document.

De plus, il ne nous était pas possible d'utiliser les cartes expérimentales des ressources pastorales, présentées hors texte dans le rapport d'inventaire¹, pour illustrer cet aspect de la cartographie d'occupation du sol, car leur réalisation ne correspond pas à l'approche méthodologique que nous avons expérimentée. En effet, d'une part l'échantillonnage des sites d'identification floristique et de prélèvement de biomasse a été effectué par choix raisonné et d'autre part le nombre de ces sites est à notre sens insuffisant pour être significatif. A titre d'exemple, le secteur de Kaédi (cf. fig. A.8.2), soit pratiquement une scène SPOT entière, est couvert par seulement 12 sites² de 3 600 m², soit un taux de sondage d'environ 0,12 p.100.

Les classifications présentées dans ce chapitre offrent une validité suffisante pour que d'une part on puisse les éditer sous forme de cartographie d'occupation du sol après mise en géométrie, lissage, habillage, etc. et que d'autre part les superficies de chaque classe soient relevées et intégrées aux estimations de superficie dont nous allons maintenant présenter les résultats.

¹DE WISPELAERE 1989

²DE WISPELAERE 1989 p.86

9. LES STATISTIQUES

Nous avons présenté à la section 4.3. une méthode d'estimation des superficies qui utilise, pour redresser les résultats issus de l'enquête de terrain, une source d'information extérieure à l'enquête. Dans notre cas il s'agit de la télédétection. Celle-ci permet le redressement d'estimations par des variables quantitatives qui sans cette correction seraient d'une précision bien moindre.

Nous allons donc présenter dans ce chapitre les estimations de superficies obtenues à l'aide de l'estimateur par la régression et celles obtenues sans redressement par les données de télédétection. Une comparaison sera ensuite effectuée en termes d'efficacité. Enfin, une analyse thématique des résultats sera proposée telle qu'elle peut être formulée à la consultation de ces documents.

9.1. LES ESTIMATIONS

En nous appuyant sur les fondements théoriques développés à la section 1.3., nous allons proposer les résultats qui valorisent le mieux l'utilisation conjointe de la télédétection et des missions de terrain. Dans un premier paragraphe les formules utilisées dans ces calculs vont être proposées sous leur forme opérationnelle puis les résultats proprement dits seront exposés. Le formulaire employé est en grande partie issu de *Théorie et pratique des sondages*¹.

9.1.1. Formulaire opérationnels

La représentativité des parcelles d'enquête permet d'estimer la superficie des différentes catégories d'occupation du sol, dans un premier temps au niveau des segments, puis dans un second temps au niveau de la zone pilote. Pour cela, une régression linéaire est effectuée entre les données de terrain, thème par thème au niveau du segment, et leurs homologues obtenus par classification, toujours par segment.

¹DESABIE 1966 : 215-219.

- *Estimateur de superficie $y_{reg k}$ au niveau du segment :*

$$y_{reg k} = \bar{y}_k + a \left(\frac{X_k}{M} - \bar{x}_k \right)$$

avec :

\bar{y}_k moyenne de la catégorie k, sur le terrain, au niveau des segments ;

a pente de la droite estimée comme suit :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ki} - \bar{x}_k)(y_{ki} - \bar{y}_k)}{\sum_{i=1}^m (x_{ki} - \bar{x}_k)^2}$$

X_k valeur du thème k pour l'ensemble de la zone pilote sur la classification ;

m nombre de segments dans l'échantillon ;

M nombre total de segments compris dans la zone pilote ;

x_{ki} nombre de pixels comptés sur la classification pour le segment z_i ;

\bar{x}_k moyenne de la catégorie k, sur la classification, au niveau des segments ;

y_{ki} nombre de pixels comptés sur le relevé de terrain pour le segment z_i .

- *Estimateur de superficie $Y_{reg k}$ au niveau de la zone pilote :*

$$Y_{reg k} = M * y_{reg k}$$

- *Variance de l'estimateur $y_{reg k}$ au niveau du segment :*

Le calcul de la variance de l'estimateur $y_{reg k}$ est destiné à déterminer la précision de cette estimation. Comme le fait remarquer J. Meyer-Roux¹ : "si X_k n'a pas de variance, $Y_{reg k}$ en a une car la droite des moindres carrés servant à le définir n'est qu'une estimation de la droite réelle inconnue.". En effet, X_k est mesuré sur la classification au niveau de la zone pilote, il n'a donc pas de variance. Notons toutefois que X_k est une donnée biaisée mais qu'il est "... préférable de prendre une

¹MEYER-ROUX 1981c p.12

donnée brute biaisée sans variance plutôt qu'une donnée non biaisée mais à variance élevée."¹.

Il est possible de déterminer la variance associée à l'estimation $y_{\text{reg } k}$ de la façon suivante :

$$\text{Var}(y_{\text{reg } k}) = \frac{(M - m)}{M} * \frac{1}{m} * \frac{1}{m - 2} * \sum_{i=1}^m e_{ki}^2$$

où
$$e_{ki}^2 = [y_{ki} - \bar{y}_k - a(x_{ki} - \bar{x}_k)]^2$$

Notons que pour calculer la somme des e_{ki} , J. Desabie² recommande de disposer d'au moins trois observations dans l'échantillon. Nous avons dans la mesure du possible suivi cette recommandation bien qu'en théorie seules deux observations soient nécessaires pour calculer une variance.

Il faut toutefois noter que la formule d'estimation de la variance présentée ici est destinée aux gros échantillons. Dans la mesure où, pour tester la méthode, nous avons travaillé sur de petites zones pilotes, donc avec un échantillon réduit (20 segments), il aurait peut être été plus judicieux d'utiliser la formule d'estimation de la variance destinée aux petits échantillons³.

Cependant, pour ne pas noyer le lecteur sous un flot d'équations, nous ne donnons la formule et les résultats que dans le cas des gros échantillons. En effet, cette méthode est destinée à être mise en pratique sur des secteurs de plus grande taille que nos zones pilotes. Il y aura de ce fait plus de segments, au moins une soixantaine (cf. 6.4.2.), et dès lors le formulaire destiné aux gros échantillons sera pleinement justifié.

Ajoutons à cela que lorsque l'on compare les coefficients de variation des deux méthodes d'estimation, la différence de résultats est relativement faible. L'estimation de variance calculée dans le cas des petits échantillon donne bien sûr un résultat moins précis.

Lorsque l'on ne dispose pas d'une calculette très sophistiquée ou d'un tableur, il est possible d'approcher cette variance par la formule suivante⁴ :

$$\text{Var}(y_{\text{reg } k}) = \frac{M - m}{M * m} * (1 - r^2) * \text{Var}(\bar{y}_k)$$

¹MEYER-ROUX 1981c p.13

²DESABIE 1966 p.218

³DESABIE 1966 p.219

⁴GROSBRAS 1987 p.139

avec :

r coefficient de corrélation entre les données de terrain et celles de la classification pour le thème k et par segment.

Nous n'avons eu recours à cette formule que pour effectuer le contrôle des résultats.

- *Variance de l'estimateur $Y_{reg k}$ au niveau de la zone pilote :*

$$\text{Var}(Y_{reg k}) = M^2 * \text{Var}(y_{reg k})$$

Comme on peut le constater, le nombre des formules nécessaires pour utiliser l'estimateur par la régression n'est pas trop élevé. Leur aspect peut toutefois paraître rébarbatif à un public de non-statisticiens. Pour faciliter la prise de contact et susciter l'utilisation de cette méthode d'estimation, nous avons développé un exemple de calcul en Annexe 7.

9.1.2. Les superficies

Comme nous venons de l'indiquer lors de la présentation des formulaires, le calcul des estimations se fait en deux temps, d'abord au niveau des segments puis au niveau de la zone pilote. Nous allons présenter séparément ces deux étapes d'acquisition des résultats car au niveau des segments, la procédure de régression permet d'analyser la relation terrain-classification alors qu'au niveau de la zone pilote, elle fournit les estimations proprement dites.

9.1.2.1. Au niveau des segments

La première étape des calculs consiste à effectuer une régression thème par thème au niveau des segments. Il s'agit donc de comparer pour le thème k sa valeur en pixels dans le segment z_i sur la carte (variable explicative x) et sur le terrain (variable expliquée y), puis de refaire la même comparaison pour tous les segments de l'échantillon. Ceci permet d'obtenir la moyenne du thème k sur la carte (\bar{x}_k) et sur le terrain (\bar{y}_k), la pente de la droite des moindres carrés (a), l'ordonnée à l'origine de cette même droite (b), le coefficient de corrélation (r), etc., tout cela au niveau des segments.

Que nous apporte l'analyse des paramètres de la régression au niveau des segments ?

A l'issue des régressions, il est enfin possible d'apprécier la qualité globale de l'inventaire, c'est-à-dire l'intensité de la relation terrain-classification. Celle-ci est caractérisée par le coefficient de corrélation (r). Il est également possible de compléter cette analyse en étudiant l'adéquation spatiale entre la représentation du thème k sur la classification et son extension sur le terrain. On compare pour cela l'indice de Hellden (MA) et le coefficient de corrélation. Enfin, c'est à cette étape que l'on peut mesurer la sur ou sous-représentation du thème k sur la classification par rapport au terrain.

tableau 9.1 - Principaux paramètres d'analyse (zone pilote de Rosso)

Sigles	\bar{x}_k	\bar{y}_k	a	b	r	MA	
Se	15,6	15,6	0,96	0,7	0,99	100	
Ci	23,2	23,0	1,03	-0,9	0,99	100	*
Sah	6,4	8,3	0,89	2,6	0,58	90,9	*
Shy	85,9	56,9	0,67	-0,5	0,78	87,5	
Sns	257,9	250,1	0,95	4,1	0,98	90,9	
Sna	51,6	61,2	1,06	6,7	0,98	81,1	*
Sv	11,8	9,7	0,72	1,3	0,99	85,7	*
Shd	200,7	237,9	1,11	15,8	0,99	87,1	
Shi	145,6	153,3	0,90	22,6	0,84	77,1	
Sae	32,4	19,1	0,37	7,2	0,80	25,0	*
Sb	9,9	5,8	0,48	1,1	0,99	57,1	*

\bar{x}_k et \bar{y}_k sont en pixels, a, b et r sont des coefficients sans unités, MA est en pour cent (cf. tab. 8.5)

* rappelle que la représentativité est insuffisante sur la matrice de confusion (cf. tab. 8.3)

Surfaces en eau (Se), Cultures irriguées (Ci), Steppes arbustives hydromorphes (Sah), Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy), Sols nus sablo-limoneux (Sns), Sols nus argileux (Sna), Sables vifs (Sv), Steppes herbeuses très claires des dunes (Shd), Steppes herbeuses des ensablements et interdunes (Shi), Steppes arbustives des ensablements (Sae), Steppes "boisées" (gommeraies) (Sb).

La qualité de la relation classification-terrain est dans l'ensemble bonne pour la zone pilote de Rosso, car pratiquement tous les coefficients de corrélation sont supérieurs ou égaux à 0,80, à l'exception notable des Steppes arbustives hydromorphes (Sah) dont le coefficient est de 0,58 (cf. tab. 9.1). Cela signifie que l'on peut considérer que globalement les thèmes concernés ont une importance comparable sur le terrain et sur la classification.

En revanche, la perception des Steppes arbustives hydromorphes (Sah) est sujette à caution. En effet, son extension sur la classification est différente de celle que l'on constate sur le terrain, sinon son coefficient de corrélation serait plus proche de un. Nous verrons un peu plus loin quel est la sur ou sous représentation de ce thème.

De même pour Lekseiba, un seul thème, les Sols nus (Sn) est caractérisé par une adéquation peu satisfaisante entre le terrain et la classification ($r = 0,52$ cf. tab. 9.2). On peut donc conclure que globalement et sur les deux zones pilotes, les classifications ont su restituer l'importance des thèmes inventoriés sur le terrain. Notons qu'entre différentes classification d'une même zone, il est possible de sélectionner la meilleure en comparant les coefficient de corrélation respectifs de chacune d'elles¹.

tableau 9.2 - Principaux paramètres d'analyse (zone pilote de Lekseiba)

Sigles	\bar{x}_k	\bar{y}_k	a	b	r	MA
Se	12,5	11,4	0,88	0,4	0,96	93,8 *
Pa	28,8	19,9	0,73	-1,2	0,85	86,8
Sah	10,6	7,7	1,10	-4,0	0,88	96,6 *
Saf	59,6	44,9	0,80	-2,6	0,97	97,0
Sa	191,8	202,2	1,13	-13,9	0,88	92,0
Sh	245,7	263,0	1,37	-73,6	0,87	91,3
Sad	184,8	233,1	0,75	94,3	0,84	92,9
Sn	130,3	84,3	0,48	22,2	0,52	91,9
Af	36,1	33,7	0,94	-0,1	0,99	95,0

\bar{x}_k et \bar{y}_k sont en pixels, a, b et r sont des coefficients sans unités, MA est en pour cent (cf. tab. 8.6)

* rappelle que la représentativité est insuffisante sur la matrice de confusion (cf. tab. 8.4)

Surfaces en eau (Se), Prairies aquatiques (Pa), Steppes arbustives hydromorphes (Sah), Steppes arbustives fermées (Saf), Steppes arbustives (Sa), Steppes herbeuses (Sh), Steppes arbustives denses dégradées (Sad), Sols nus (Sn), Affleurements rocheux (Af).

On peut dans ce cas précis remplacer l'analyse des paramètres de la matrice de confusion par ceux des régressions. Cependant, l'estimateur par la régression ne nous renseigne pas sur l'adéquation spatiale terrain-classification des différents thèmes. C'est pour cela que l'indice de Hellden (MA), calculé sur la matrice de confusion, a été associé à cette analyse. En effet, celui-ci synthétise, à l'aide des points de contrôle, la relation terrain-classification et permet de connaître

¹MEYER-ROUX 1981b p.13

l'adéquation spatiale des thèmes. Associé au coefficient de corrélation, il permet un contrôle plus pointu de cette relation.

A titre d'exemple, on constate que les Surfaces en eau (Se) de Rosso (cf. tab. 9.1) occupent une superficie comparable sur le terrain et la classification ($r = 0,99$). De plus, l'indice de Hellden (MA = 100) indique qu'elles sont localisées au même endroit sur la carte et le terrain, et cela au moins au niveau des segments.

Cette comparaison permet également de se rendre compte que deux thèmes sont le siège d'erreurs d'observation élevées. Il s'agit des Steppes arbustives hydromorphes (Sah) à Rosso (cf. tab. 9.1) et des Sols nus (Sn) à Lekseiba (cf. tab. 9.2). En effet, dans les deux cas, le coefficient de corrélation indique une mauvaise adéquation globale entre le comptage effectué sur les segments de terrain et celui effectué sur ceux de la classification, alors que l'indice de Hellden indique une bonne adéquation spatiale. L'antagonisme de ces résultats signifie qu'il y a probablement eu des erreurs d'observation lors des sondages du dépouillement de l'enquête de terrain et/ou du contrôle de la classification (cf. 7.3.2.3. et 8.3.2.1.).

Notons toutefois que dans la cas de Rosso, l'indice de Hellden des Steppes arbustives hydromorphes (Sah) est donné à titre indicatif en raison d'une représentativité insuffisante (notée * dans le tableau 9.1).

En conséquence, comme il n'est pas possible de savoir, de l'estimateur par la régression ou du contrôle de la classification, lequel capitalise le plus d'erreurs d'observation lors des sondages, il faut considérer que la cartographie et l'estimation de superficies de ces deux thèmes sont sujettes à caution.

Cependant, on peut dire qu'il y a une bonne adéquation globale entre le terrain et les classifications. Toutefois, ces dernières ne sont pas parfaites dans la mesure où aucun des coefficients de corrélation n'atteint la valeur de un. Nous allons donc déterminer quelle est la sur ou sous-représentation de chacun des thèmes sur la carte. Cette information est en théorie fournie par l'étude des coefficients a et b de la droite de régression.

Rappelons que si la classification était parfaite (cf. 4.3.1.4.), l'équation de la droite de régression serait identique à celle de la bissectrice, c'est-à-dire de la forme :

$$y = a x + b$$

avec a égal à un et b égal à zéro. Comme nous l'avons expliqué, dans la réalité, la valeur de a tourne autour de un et celle de b n'est jamais très éloignée de la valeur zéro, mais cela signifie qu'il y a un biais dans la classification et donc une sur ou sous-représentation thématique qu'il nous faut connaître.

Cette sur ou sous-représentation de la classification est plus directement appréciée en comparant au niveau des segments la valeur des moyennes du thème k sur la carte (\bar{x}_k) et sur le terrain (\bar{y}_k). Lorsque \bar{x}_k est supérieur à \bar{y}_k , le thème k est sur-représenté sur la classification par rapport au terrain, lorsque \bar{y}_k est supérieur à \bar{x}_k , le thème k est sous-représenté sur la classification par rapport au terrain. Ceci est non seulement valable au niveau des segments mais aussi au niveau de la zone pilote comme nous le verrons plus loin (cf. 9.3.2.).

Pour sélectionner les thèmes nettement sur ou sous-représentés, nous avons retenu ceux dont les deux moyennes différaient de plus de 20 p.100.

Pour Rosso, un seul thème est nettement sous-représenté, il s'agit des Steppes arbustives hydromorphes (Sah). En revanche, ils sont quatre à être nettement sur-représentés, ce sont les catégories Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy), Sables vifs (Sv), Steppes arbustives des ensablements (Sae) et Steppes "boisées" (gommeraies) (Sb).

A Lekseiba, un seul thème est nettement sous-représenté, les Steppes arbustives denses dégradées (Sad). Les Prairies aquatiques (Pa), Steppes arbustives hydromorphes (Sah), Steppes arbustives fermées (Saf) et Sols nus (Sn) sont eux nettement sur-représentés.

Rappelons que l'origine des sur ou sous-représentations des classifications par rapport au terrain est liée à des problèmes de confusion radiométrique inhérents à la qualité des données et/ou à des erreurs d'observation dues aux conditions d'inventaires.

La classification est donc un peu moins fidèle pour Lekseiba que pour Rosso car si pour les deux zones pilotes, cinq thèmes ont une distorsion marquée entre le terrain et la classification, Rosso conserve six thèmes pour lesquels la relation est satisfaisante alors que Lekseiba n'en comporte que quatre. Cependant, comme nous allons le voir maintenant, une estimation qui apparaît encore peu satisfaisante au niveau des segments devient très intéressante au niveau de la zone pilote après redressement par la méthode de l'estimateur par la régression.

9.1.2.2. *Au niveau des zones pilotes*

La présentation des estimations calculées sur les zones pilotes peut se scinder en deux parties. La première, plutôt technique, concerne le niveau de précision des résultats, elle va être exposée ici. La seconde concerne l'analyse des résultats en tant que "contribution à l'étude du milieu", elle est proposée à la section 9.4..

Les résultats présentés ici sont "bruts", c'est-à-dire tels qu'ils sont obtenus à l'issue des calculs de régression. Ils ont toutefois été convertis en hectares car cette unité de surface est plus familière et parlante que le pixel, l'unité de calcul. Rappelons qu'un exemple de calcul d'estimation de superficie est développé en Annexe 7.

Ces résultats ne sont toutefois pas encore présentables au public, car l'estimation par la régression "laisse de côté" presque 5 p.100 des surfaces en raison du mode de calcul et des arrondis (cf. tab. 9.3 et 9.4). Il est donc nécessaire d'effectuer une mise au propre pour publication. La méthode la plus simple consiste à ventiler dans les différentes catégories répertoriées et au prorata de leur superficie les surfaces non affectées. En cela, nous procédons à l'instar des services officiels de statistiques utilisant l'estimateur par la régression. Les résultats ainsi rendus présentables sont analysés à la section 9.4., comme nous l'avons indiqué précédemment.

Bien que cette méthode d'inventaire utilise de petits échantillons, pour mémoire environ 1 p.100 de la surface de la zone pilote, la précision des estimation de superficies est élevée. Cependant, cette précision est fonction de deux facteurs, elle dépend d'une part de la qualité de la relation terrain-classification et d'autre part de la variabilité des proportions d'occupation du sol d'un segment sur l'autre.

Lorsque le coefficient de corrélation (r) et la variabilité sont faibles, la précision relative est élevée. Inversement, lorsque le coefficient de corrélation (r) et la variabilité sont élevés, elle est faible. La précision relative des estimations est appréciée par l'intermédiaire du coefficient de variation. Rappelons que le coefficient de variation (CV) est :

$$CV = \frac{\sqrt{\text{Var}(Y_{\text{reg } k})}}{Y_{\text{reg } k}} * 100$$

avec :

$Y_{\text{reg } k}$ estimation de la superficie par régression du thème k au niveau de la zone pilote ;

$\text{Var}(Y_{\text{reg } k})$ variance de cette estimation.

Pour apprécier plus facilement la précision de chacun des estimateurs, nous avons regroupé les coefficients de variation en trois classes. Les seuils de classe sont les mêmes que ceux utilisés au point 8.3.2.2., à savoir : coefficient de variation inférieur à 15 p.100, compris entre 15 et 25 p.100 et supérieur à 25 p.100.

Les thèmes dont la précision relative est supérieure à 85 p.100 ($CV < 15$ p.100) sont au nombre de quatre pour Rosso. Il s'agit des Surfaces en eau (Se), Sols nus sablo-limoneux (Sns), Sables vifs (Sv) et Steppes herbeuses très claires des dunes (Shd). Ces catégories jouissent d'une bonne relation entre les données de terrain et la classification, leur coefficient de corrélation est d'environ 0,99 (cf. tab. 9.1). De plus la proportion de ces thèmes d'un segment à l'autre est relativement constante (cf. Annexe 7).

tableau 9.3 - Superficies estimées par régression (zone pilote de Rosso)

Thèmes	Sigles	Superficies		Ecart types		CV
		ha	%	ha	%	
Surfaces en eau	Se	677	1,6	59		8,8
Cultures irriguées	Ci	307	0,7	50		16,4
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	755	1,8	150		19,9
St. herbeuses très claires des dépr. hydro.	Shy	5 314	12,7	927		17,5
Sols nus sablo-limoneux	Sns	10 363	24,8	505		4,9
Sols nus argileux	Sna	1 703	4,1	285		16,7
Sables vifs	Sv	622	1,5	52		8,3
St. herbeuses très claires des dunes	Shd	10 996	26,3	478		4,4
St. herb. des ensablements et interdunes	Shi	7 952	19,0	1243		15,6
St. arbustives des ensablements	Sae	1 141	2,7	360		31,5
Steppes "boisées" gomméraires	Sb	239	0,6	36		15,2
Total partiel		40 068	95,9			
Surfaces non affectées		1 711	4,1			
Surface totale		41 779	100			

Les thèmes dont la précision relative est comprise entre 75 et 85 p.100 ($15 \text{ p.100} < CV < 25 \text{ p.100}$) sont au nombre de six. Il s'agit des Cultures irriguées (Ci), Steppes arbustives hydromorphes (Sah), Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy), Sols nus argileux (Sna), Steppes herbeuses des ensablements et interdunes (Shi) et Steppes "boisées" (gomméraires) (Sb). Les coefficients de corrélation qui caractérisent les thèmes de cette classe sont beaucoup plus variables que dans la précédente, ils sont compris pour la plupart entre 0,99 et 0,78 à une exception près, celle des Steppes arbustives hydromorphes (Sah). Celles-ci sont caractérisées par une mauvaise relation entre le terrain et la classification ($r = 0,58$ cf. tab. 9.1). Elles appartiennent pourtant à cette classe en raison d'une proportion d'occupation du sol relativement constante d'un segment à l'autre (cf. Annexe 7).

Il n'y a qu'un seul thème dont la précision relative soit inférieure à 75 p.100, les Steppes arbustives des ensablements (Sae) dont le coefficient de variation est de 31,5 p.100. Ce résultat est lié d'une part à une variabilité élevée de la proportion d'occupation du sol d'un segment sur l'autre et, d'autre part, à une adéquation moyenne entre le terrain et la classification ($r = 0,80$).

D'une manière générale, la précision des estimations sur la zone pilote de Rosso peut donc être considérée comme satisfaisante.

tableau 9.4 - Superficies estimées par régression (zone pilote de Lekseiba)

Thèmes	Sigles	Superficies		Ecart types		CV
		ha	%	ha	%	
Surfaces en eau	Se	2 266	5,4	83		3,7
Prairies aquatiques	Pa	2 199	5,2	269		12,2
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	1 113	2,7	141		12,7
Steppes arbustives fermées	Saf	1 188	2,8	256		21,6
Steppes arbustives	Sa	8 431	20,1	831		9,9
Steppes herbeuses	Sh	9 126	21,8	946		10,4
Steppes arbustives denses dégradées	Sad	11 630	27,7	961		8,3
Sols nus	Sn	3 881	9,3	925		23,8
Affleurements rocheux	Af	608	1,4	34		5,6
Total partiel		40 442	96,4			
Surfaces non affectées		1 501	3,6			
Surface totale		41 943	100			

Il faut noter à la lecture de ces deux tableaux (cf. tab. 9.3 et 9.4) que la superficie totale des deux zones pilotes est un peu différente. Le fichier informatique est une matrice de 1 022 pixels de côté à Rosso, alors qu'il fait 1 024 pixels pour Lekseiba. Cela provient du fait que pour Rosso une erreur de manipulation a écrasé le pixel de bordure sur la classification et que lorsque nous avons constaté cet incident, mineur il est vrai, nous ne pouvions plus refaire les traitements.

Le même découpage a été appliqué à Lekseiba. Il donne les résultats suivants.

Sept thèmes sur neuf ont une précision relative supérieure à 85 p.100 ($CV < 15$ p.100). Il s'agit des thèmes Surfaces en eau (Se), Prairies aquatiques (Pa), Steppes arbustives hydromorphes (Sah), Steppes arbustives (Sa), Steppes herbeuses (Sh), Steppes arbustives denses dégradées (Sad) et Affleurements rocheux (Af). Ces thèmes sont caractérisés par une bonne relation entre le terrain et la classification. Leur coefficient de corrélation est compris entre 0,84 et 0,99 (cf. tab. 9.2). Ils ont dans

l'ensemble une proportion d'occupation du sol assez constante d'un segment à l'autre (cf. Annexe 7).

Les deux thèmes restants, les Steppes arbustives fermées (Saf) et les Sols nus (Sn), ont une précision relative comprise entre 75 et 85 p.100 ($15 \text{ p.100} < CV < 25 \text{ p.100}$). Leur classement est moins performant que pour les précédents thèmes car pour les Sols nus (Sn), la relation terrain-classification est mauvaise, elle est caractérisée par un r de 0,58. En revanche pour les Steppes arbustives fermées (Saf), elle est meilleure mais la variabilité de la proportion d'occupation du sol est plus forte.

En conclusion, nous constatons que si les résultats des deux zones pilotes sont relativement précis, on le doit en grande partie à la qualité de la relation terrain-classification. Plus celle-ci est élevée, moins la variabilité de la proportion d'occupation du sol au niveau des segments n'a d'influence sur les estimations de superficie calculées au niveau de la zone pilote.

Nous verrons au paragraphe 9.3.1. que cette qualité peut s'évaluer en termes d'efficacité de l'estimation. En attendant cette évaluation, nous allons envisager notre problématique d'inventaire en cas d'absence de données satellitaires.

9.2. EXTRAPOLATION EN L'ABSENCE DE DONNÉES SATELLITAIRES

Depuis que nous avons abordé la troisième partie et les différents résultats obtenus, nous n'avons jamais envisagé le fait d'être privé de données numériques. Or sans elles, il n'est pas possible de réaliser de stratifications automatiques (cf. 7.1.), de déterminer comme nous l'avons fait la taille optimale du segment d'enquête (cf. 7.2.), ni surtout de réaliser les classifications (cf. 8.) qui fournissent l'information quantitative nécessaire au redressement des résultats de l'inventaire par l'estimateur par la régression (cf. 9.1).

L'absence de données numériques n'est pas un frein à la réalisation d'un inventaire par méthodes aréolaires et aléatoires (cf. 4.2.). Bien que nous soyons maintenant certain qu'il est préférable de préparer puis de réaliser l'inventaire avec des données satellitaires sous forme numérique, nous avons enquêté la zone pilote de Lekseïba avec des agrandissements analogiques. Pendant la mission de terrain, la société SPOT Image devait réaliser une prise de vue. Celle-ci a bien eu lieu, mais que serait-il advenu si pour une raison ou une autre, cette prise de vue n'avait pu avoir lieu ?

C'est pour parer à cette éventualité que cette section a été développée. Elle vise à pallier toute absence de cartographie supervisée ou non, absence qui interdit l'utilisation de l'estimateur par la régression.

Notons qu'il est souvent possible d'utiliser des données satellitaires numériques antérieures à la mission pour réaliser une cartographie d'occupation du sol satisfaisante, contrairement à l'inventaire des potentialités pastorales tributaires des précipitations de l'année pour l'évaluation de la production végétale. Cette évaluation requiert donc des données satellitaires numériques concomitantes aux observations et comptages de terrain (cf. 5.2.).

En ce qui concerne l'occupation du sol, en dehors des catastrophes naturelles et/ou climatiques, le paysage surtout en milieu naturel est rarement bouleversé d'une année sur l'autre. Il est donc possible d'obtenir une classification encore très fidèle avec des données satellitaires de quelques années antérieures. H. Andrianasolo¹ semble indiquer que la "durée de vie" d'une classification de ce type est de trois à cinq ans. Il est donc apparemment toujours possible en milieu naturel sahélien d'obtenir des données numériques satisfaisantes.

Cependant, au cas où ces données seraient trop mauvaises pour être exploitées automatiquement (brumes, nuages, distorsions radiométriques, etc.), voire absentes, il est toutefois possible de valoriser l'enquête de terrain en publiant des résultats d'inventaire encore très satisfaisants, d'un point de vue statistique, c'est ce que nous allons présenter ici, et d'un point de vue cartographique.

Dans la mesure où la cartographie est issue d'une photointerprétation "manuelle" du document analogique ou du document numérique dont on n'a pas pu réaliser de classification automatique satisfaisante, cet aspect n'est pas développé ici. Pour en savoir plus sur la façon de réaliser ce type de cartographie, on se reportera à des ouvrages relatifs à la photointerprétation. Les résultats statistiques issus d'un comptage sur ce type de document ne peuvent bien sûr en aucun cas servir d'information quantitative extérieure dans la méthode d'estimation par la régression, en raison du biais non constant introduit par le photointerprète.

Comme à la section précédente, nous présenterons d'abord les formulaires retenus pour l'estimation des différents paramètres de l'inventaire, puis une analyse des résultats en termes de précision sera proposée.

¹ ANDRIANASOLO 1990 p.7

9.2.1. Formulaire opérationnels

Les formulaires que nous allons présenter maintenant sont issus de méthodes d'inventaires que le SCEES a testées en milieu agricole tempéré¹. Contrairement au protocole de recherche décrit dans ce travail, le SCEES ne disposait pas de documents satellitaires numériques pour réaliser son inventaire, et ne pouvait donc pas utiliser les formulaires d'estimation par la régression pour évaluer les superficies des différentes classes d'occupation du sol.

En raison de la proximité méthodologique des deux approches, nous avons adapté au milieu naturel leur méthode d'inventaire et d'estimation. La méthode d'inventaire, c'est-à-dire de collecte et de dépouillement de l'information, est celle dont nous nous sommes inspiré tout au long de cette recherche, quant à la méthode d'estimation, elle va être décrite maintenant.

Pour utiliser ce formulaire d'estimation, il faut donc être en possession des proportions d'occupation du sol des différents thèmes reconnus sur le terrain à l'intérieur des segments. Pour cela, on reprend la méthode du calcul d'une proportion proposée au point 7.3.2.3.. Le sondage ne se fait pas à l'écran, à moins de numériser la photographie ou l'agrandissement analogique du segment d'enquête, mais sur le tirage à l'aide d'une grille de fréquence.

- *Estimation de la superficie du thème k :*

$$S_k = S_{zp} * \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m P_{ki}$$

et

$$P_{ki} = \frac{n_{ki}}{N_i}$$

avec :

P_{ki} proportion d'occupation du sol du thème k dans le segment z_i ;

n_{ki} nombre de pixels du thème k tirés dans le segment z_i ;

N_i nombre total de pixels tirés dans le segment z_i ;

m nombre de segments inventoriés ;

¹FOURNIER 1986

S_{zp} superficie de la zone pilote ;

S_k superficie du thème k sur la zone pilote.

- *Variance de l'estimation de la superficie S_k :*

$$\text{Var}(S_k) = S_{zp}^2 * \frac{1}{m} * \frac{1}{m-1} * \frac{M-m}{M} * \sum_{i=1}^m (P_{ki} - \bar{P}_k)^2$$

avec :

\bar{P}_k estimation de la proportion moyenne de la catégorie k ;

M nombre total de segments couvrant la zone pilote ;

$\frac{M-m}{m}$ très proche de 0,99 ou 0,98 dans la mesure où le taux de sondage est de l'ordre de 1 à 2 p.100.

Notons que comme l'indique Ph. Fournier¹ : "*Dans le cas d'un sondage aléatoire à un degré, avec des probabilités égales et sans remise, on utilise la formule de la variance d'une somme. Il n'est pas tenu compte du fait que le tirage des segments est plus ou moins stratifié, cet estimateur de la variance d'une somme est, en conséquence, calculé avec une surestimation certaine.*"

Muni de ces formulaires, il est maintenant possible de déterminer les estimations de superficie et la précision de ces estimations en l'absence de données satellitaires numériques satisfaisantes.

9.2.2. Les résultats

Les résultats publiés dans cette section correspondent, rappelons-le, à des estimations obtenues avec la seule enquête de terrain, c'est-à-dire sans l'apport des données satellitaires numériques.

La précision des estimations de superficie est nettement moins bonne que lorsqu'elle est obtenue avec l'estimateur par la régression. Seuls quelques thèmes ont des paramètres compatibles avec la précision minimale recherchée lors d'un inventaire d'occupation du sol. La dégradation de la précision des estimations fait

¹FOURNIER 1986 p.28

que l'on a renoncé à prendre les seuils de classe retenus jusqu'à présent pour qualifier les estimations (cf. 8.3.2.2. et 9.1.2.2.).

Les seuils retenus sont ici fonction de la distribution des coefficients de variation (CV). Leur consultation individualise trois groupes.

Il y a les thèmes dont la précision relative est comprise entre 70 et 80 p.100 (20 p. 100 < CV < 30 p.100), il s'agit des Sols nus sablo-limoneux (Sns), Steppes herbeuses très claires des dunes (Shd) et Steppes herbeuses des ensablements et interdunes (Shi). On constate par ailleurs qu'ils occupent les superficies estimées les plus importantes, supérieures à 20 p.100.

Ensuite, il y a les thèmes dont la précision relative est d'environ 50 p.100, il s'agit des Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy) et des Sols nus argileux (Sna). Leur surface est beaucoup plus restreinte, elle est comprise entre 5 et 10 p.100.

Enfin, il y a tous les autres thèmes dont la précision relative est inférieure à 50 p. 100. Ceux-ci ont une superficie estimée inférieure à 5 p.100.

tableau 9.5 - Superficies estimées sans régression (zone pilote de Rosso)

Thèmes	Sigles	Superficies		Ecart types		CV
		ha	%	ha	%	
Surfaces en eau	Se	777	1,9	528	68,3	
Cultures irriguées	Ci	1 143	2,7	1 030	90,1	
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	415	0,9	551	130,4	
St. herbeuses très claires des dépr. hydro.	Shy	2 827	6,8	1 445	51,1	
Sols nus sablo-limoneux	Sns	12 425	29,7	2 819	22,7	
Sols nus argileux	Sna	3 040	7,3	1 465	49,5	
Sables vifs	Sv	484	1,2	336	69,3	
St. herbeuses très claires des dunes	Shd	11 816	28,3	3 206	27,1	
St. herb. des ensablements et interdunes	Shi	7 613	18,2	2 265	29,7	
St. arbustives des ensablements	Sae	951	2,3	579	60,9	
Steppes "boisées" gommériaies	Sb	288	0,7	228	79,2	
Surface totale		41 779	100			

Notons que pour certains thèmes le coefficient de variation est tellement élevé, telles les Steppes arbustives hydromorphes (Sah) avec un CV de 130,4 p.100, que seul l'ordre de grandeur conserve une signification. Ce thème est marginal dans le paysage avec probablement moins de 5 p.100 de la superficie de la zone pilote. On trouvera l'estimation précise de sa superficie au tableau 9.3.

Il semble donc à la lecture des résultats de Rosso que la surface de la catégorie ait une grande influence sur la précision de l'estimation. Qu'en est-il pour Lekseïba ?

Tout comme pour Rosso, la précision relative des estimations est fonction de la superficie à laquelle elle se rapporte. Elle est d'ailleurs légèrement meilleure qu'à Rosso.

Trois thèmes ont une précision relative supérieure à 80 p.100. Il s'agit des Steppes arbustives (Sa), Steppes herbeuses (Sh), Steppes arbustives denses dégradées (Sad). Leur superficie est comprise entre 20 et 30 p.100.

D'une précision relative légèrement moindre (CV de 27 p.100), les Sols nus (Sn) ont une superficie de presque 10 p.100. Ensuite, pour les thèmes restants, les coefficients de variation s'échelonnent entre 50 et 80 p.100 pour des superficies inférieures à 5 p.100.

tableau 9.6 - Superficies estimées sans régression (zone pilote de Lekseïba)

Thèmes	Sigles	Superficies		Ecart types		CV
		ha	%	ha	%	
Surfaces en eau	Se	529	1,3	322	60,9	
Prairies aquatiques	Pa	927	2,2	499	53,8	
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	359	0,9	296	82,4	
Steppes arbustives fermées	Saf	2 090	4,9	1 437	68,8	
Steppes arbustives	Sa	9 423	22,5	1 690	18,0	
Steppes herbeuses	Sh	12 257	29,2	1 883	15,4	
Steppes arbustives denses dégradées	Sad	10 821	25,9	1 752	16,1	
Sols nus	Sn	3 929	9,4	1 060	27,0	
Affleurements rocheux	Af	1 568	3,7	1 057	67,4	
Surface totale		41 943	100			

De l'analyse de ces résultats et en l'absence de données satellitaires numériques, il ressort que le plan de sondage mis en place n'est satisfaisant que pour les thèmes dont la superficie est importante, en général supérieur à 20 p.100 de la surface de la zone pilote. Pour ceux dont la superficie est inférieure à 5 p.100 de la zone pilote, les estimations sont trop imprécises pour être utilisées lors d'une quelconque action d'aménagement ou de protection.

On a une très bonne appréhension du phénomène sur la figure 9.1. Celle-ci regroupe les 20 thèmes des deux zones pilotes sur un même graphe où, en abscisse sont portées les surfaces estimées de chaque thème (en valeur relative), c'est la

variable explicative, et en ordonnées, les coefficients de variation, c'est la variable expliquée, qui leur sont associés.

La relation qui unit ces deux variables est de type logarithmique. Nous avons donc calculé les logarithmes des coordonnées des points du nuage et, à partir de cette transformée, nous avons effectué une régression linéaire de la forme :

$$y = a x + b$$

qui devient :

$$\log CV = - 0,43 \log S_k + 1,96$$

avec :

CV coefficient de variation de la superficie S_k ;

S_k superficie estimée du thème k pour la zone pilote.

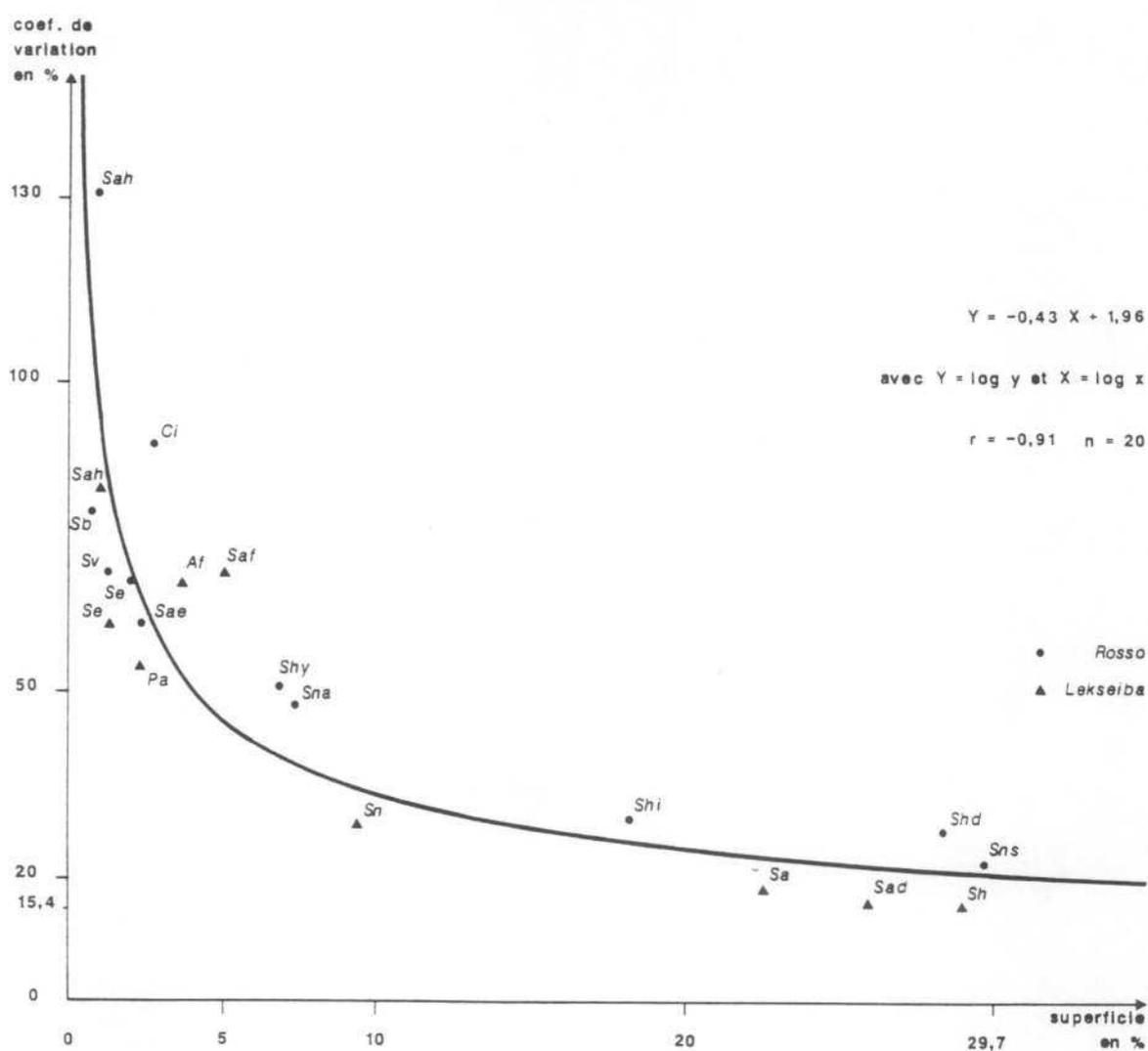
Le coefficient de corrélation est de - 0,91 pour 18 degrés de liberté et un risque inférieur à 1 p.100. A titre de comparaison, pour une régression linéaire sur les valeurs non transformées, le coefficient de corrélation n'était que de - 0,81.

Cette relation forte et inverse, démontre logiquement que plus les surfaces sont importantes plus les coefficients de variations diminuent, au moins pour ce plan de sondage. Ce phénomène possède une limite visible sur la figure 9.1 : le comportement asymptotique de la courbe. En effet, au-delà de 20 à 30 p.100 de superficie le rendement d'un thème d'une taille supérieure serait de toute façon assez faible, en dehors des problèmes d'uniformité de l'occupation du sol ou de la mauvaise échelle d'étude qui surgiraient.

Pour améliorer la précision des thèmes d'extension réduite, il existe au moins deux solutions. Il est par exemple possible d'accroître le taux de sondage. Cependant, comme le fait remarquer Ph. Brion¹, l'imprécision ne diminue que d'un facteur $1/\sqrt{m}$. Cela signifie que lorsque l'on multiplie par quatre le nombre des segments, la précision de l'estimation ne croît que d'un facteur deux. Il y a donc un risque élevé pour que le nombre de segments augmente indéfiniment et que la précision de certains thèmes ne s'améliore pas sensiblement. C'est pour cela qu'il nous paraît préférable de disposer de données satellitaires numériques et de recourir à l'estimateur par la régression pour améliorer la précision des résultats.

¹BRION 1982 p.12

figure 9.1 - Graphe de la relation superficie-coefficient de variation (zones pilotes de Rosso et Lekseiba associées)



En conclusion, l'absence de données satellitaires numériques ne nous aurait pas permis de réaliser une étude très fine du paysage. Seuls, les thèmes de grande extension ont des résultats suffisamment fiables et précis pour que l'on puisse les utiliser comme base de réflexion dans une opération de diagnostic et d'aménagement.

Notons que, dans le cadre d'un inventaire opérationnel, le nombre des segments étant nettement supérieur aux 20 unités d'enquête utilisées ici, la précision des estimations s'améliorerait sur certaines catégories d'occupation du sol. Toutefois, comme nous l'avons indiqué précédemment, cette amélioration profiterait aux "grands thèmes" et à quelques thèmes de taille intermédiaire, mais certainement pas de manière significative aux petits.

Cette méthode d'inventaire, privée de l'apport des données numériques, n'a qu'un rôle palliatif dans notre démonstration. Elle permet de ne pas perdre une campagne de terrain. Comme cela va être démontré maintenant, seul l'apport des données numériques peut permettre le gain de précision qui rend cette méthode d'inventaire réellement opérationnelle et attractive aux yeux des bailleurs de fonds et des agents ayant en charge le développement et l'aménagement du territoire.

9.3. EFFICACITÉ DES DIFFÉRENTES MÉTHODES

Deux types de comparaisons sont intéressants à réaliser pour déterminer la portée de l'amélioration engendrée par l'apport des données satellitaires numériques sur les estimations de superficies. Premièrement, il s'agit de déterminer le gain de précision entre un inventaire qui bénéficie de l'apport des données satellitaires numériques et un inventaire qui n'en bénéficie pas. Deuxièmement, nous verrons s'il est possible de faire l'économie des calculs d'estimateur par la régression en n'utilisant que les résultats des classifications comme estimateur de superficies.

9.3.1. Avec ou sans l'estimateur par la régression

Pour évaluer l'apport de l'estimateur par la régression dans les inventaires d'occupation du sol, nous allons dans un premier temps comparer les coefficients de variations obtenus sans les données satellitaires numériques à ceux obtenus avec l'apport des données numériques. Puis cette évaluation sera proposée en termes d'efficacité.

9.3.1.1. Comparaison des coefficients de variation

La comparaison poste par poste des coefficients de variation (CV) indique une évolution très sensible de la précision des résultats. Pour la zone pilote de Rosso, la moyenne des coefficients passe de 61,5 p.100 à 14,5 p.100 lorsque l'on peut utiliser l'estimateur par la régression dans les calculs.

En termes de précision relative, la précision moyenne des estimations passe de 38,5 à 85,5 p.100 dès lors qu'elles sont corrigées par la régression. Rappelons que la précision relative est le complémentaire du coefficient de variation, c'est-à-dire : $100 - CV$. Après correction, la précision relative moyenne de l'estimation est donc très satisfaisante, au sens où nous l'avons définie au point 8.3.2.2., c'est-à-dire supérieure à 85 p.100.

tableau 9.7 - Comparaison des précisions relatives (zone pilote de Rosso)

Thèmes	Sigles	Sans Estim.Reg.	Avec Estim. Reg.	
		CV %	CV %	Superficies %
Surfaces en eau	Se	68,3	8,8	1,6
Cultures irriguées	Ci	90,1	16,4	0,7
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	130,4	19,9	1,8
St. herbeuses très claires des dépr. hydro.	Shy	51,1	17,5	12,7
Sols nus sablo-limoneux	Sns	22,7	4,9	24,8
Sols nus argileux	Sna	49,5	16,7	4,1
Sables vifs	Sv	69,3	8,3	1,5
St. herbeuses très claires des dunes	Shd	27,1	4,4	26,3
St. herb. des ensablements et interdunes	Shi	29,7	15,6	19,0
St. arbustives des ensablements	Sae	60,9	31,5	2,7
Steppes "boisées" gommériaies	Sb	79,2	15,2	0,6
Moyennes		61,5	14,5	

Pratiquement tous les thèmes bénéficient d'une amélioration de leur précision relative, cependant cette amélioration est beaucoup plus spectaculaire pour les thèmes d'étendue réduite. En effet, bien qu'ils soient faiblement inventoriés dans l'échantillon, la correction par la régression permet de leur associer une estimation dont la précision les rend enfin utilisables.

L'amélioration la plus spectaculaire concerne bien sûr les Steppes arbustives hydromorphes (Sah) qui passent de 130,4 p.100 à 19,9 p.100. Elle est aussi très appréciable pour des thèmes comme les Surfaces en eau (Se) et les Sables vifs (Sv). Seules les Steppes arbustives des ensablements (Sae) ne bénéficient que d'un accroissement de précision modéré en raison d'ambiguïtés radiométriques (cf. 8.1.).

Tout comme pour Rosso, les résultats de Lekseiba ont largement profité de l'apport de la télédétection (cf. tab. 9.8). La valeur moyenne des coefficients de variation est passée de 45,5 p.100 à 12 p.100 avec l'utilisation des estimations par la régression. La précision relative moyenne des estimations passe donc de 54,5 p.100 à 88 p.100 dès lors que celles-ci sont corrigées par la régression. Supérieure à 85 p.100, elle est très satisfaisante, selon les critères développés au point 8.3.2.2..

Ici aussi, le gain de précision concerne tous les thèmes mais il est particulièrement spectaculaire pour les thèmes de faible extension. Il faut noter l'amélioration qui touche les Surfaces en eau (Se) et les Affleurements rocheux (Af). A l'inverse, en raison d'une mauvaise relation entre terrain et classification (cf. tab. 9.2), les Sols nus (Sn) sont le seul thème qui n'enregistre à Lekseiba qu'un gain minime.

tableau 9.8 - Comparaison des précisions relatives (zone pilote de Lekseiba)

Thèmes	Sigles	Sans Estim.Reg.	Avec Estim. Reg.	
		CV %	CV %	Superficies %
Surfaces en eau	Se	60,9	3,7	5,4
Prairies aquatiques	Pa	53,8	12,2	5,2
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	82,4	12,7	2,7
Steppes arbustives fermées	Saf	68,8	21,6	2,8
Steppes arbustives	Sa	18,0	9,9	20,1
Steppes herbeuses	Sh	15,4	10,4	21,8
Steppes arbustives denses dégradées	Sad	16,1	8,3	27,7
Sols nus	Sn	27,0	23,8	9,3
Affleurements rocheux	Af	67,4	5,6	1,4
Moyennes		45,5	12,0	

En conclusion, l'apport des données satellitaires numériques permet d'obtenir un gain de précision très important pour l'ensemble des thèmes recensés dans l'inventaire. **Cependant, nous constatons que ce gain profite surtout aux thèmes de faible extension, thèmes que l'inventaire, privé de données numériques, ne peut évaluer de façon satisfaisante.** C'est un des principaux avantages de l'estimateur par la régression, il permet ainsi avec un échantillonnage léger d'estimer la précision des thèmes de faible superficie. Toutefois, la télédétection ne révélera pas ce que l'enquête de terrain n'a pu saisir par inadéquation du plan de sondage à la taille et à la répartition des thèmes considérés.

Donc même lorsque le coefficient de corrélation indique que la classification n'est pas très fidèle au terrain, le gain de précision que l'on peut attendre de l'estimateur par la régression est très significatif comparé à une estimation sans correction par régression. Nous allons voir maintenant que ce gain de précision peut être évalué en termes d'efficacité.

9.3.1.2. *Efficacité des corrections par régression*

Tout comme il est possible de contrôler l'efficacité d'un sondage stratifié par rapport à un sondage élémentaire, il est possible de contrôler l'efficacité des estimations par la régression par rapport à une estimation "élémentaire". Si l'on identifie l'estimation élémentaire à une estimation sans apport de la télédétection, nous considérons à la suite de J. Meyer-Roux¹ que l'efficacité E_f de la télédétection peut être mesurée par le rapport :

$$E_f = \frac{1}{1 - r^2}$$

où r est le coefficient de corrélation.

Une efficacité E_f égale à 3,4 correspond à un coefficient de corrélation de 0,84, exemple des Steppes arbustives denses dégradées (Sad) à Lekseïba (cf. tab. 9.10). Elle signifie que sans l'apport de l'estimateur par la régression, il faudrait 3,4 fois plus de segments pour faire l'inventaire de ce thème et obtenir la même précision relative, à savoir 91,7 p.100, c'est-à-dire un CV de 8,3 p.100.

Nous constatons donc que pour Rosso (cf. tab. 9.9), en fonction du coefficient de corrélation r , le gain de précision pour 20 segments par rapport au sondage élémentaire, va de 1,5 fois pour les Steppes arbustives hydromorphes (Sah) à 50,3 fois pour des thèmes comme les Surfaces en eau (Se) ou les Steppes "boisées" gommériaies (Sb).

A Rosso, la précision moyenne est 28,4 fois plus élevée qu'en l'absence de correction par la régression, alors qu'à Lekseïba, l'efficacité moyenne n'est que de 11,3 pour l'ensemble des catégories en raison d'une classification un peu moins performante. Le coefficient de corrélation moyen est de 0,86 contre 0,90 à Rosso.

¹MEYER-ROUX 1981c p.13

tableau 9.9 - Efficacité de la télédétection (zone pilote de Rosso)

Thèmes	Sigles	Superficies %	r	Ef
Surfaces en eau	Se	1,6	0,99	50,3
Cultures irriguées	Ci	0,7	0,99	50,3
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	1,8	0,58	1,5
St. herbeuses très claires des dépr. hydro.	Shy	12,7	0,78	2,6
Sols nus sablo-limoneux	Sns	24,8	0,98	25,3
Sols nus argileux	Sna	4,1	0,98	25,3
Sables vifs	Sv	1,5	0,99	50,3
St. herbeuses très claires des dunes	Shd	26,3	0,99	50,3
St. herb. des ensablements et interdunes	Shi	19,0	0,85	3,6
St. arbustives des ensablements	Sae	2,7	0,80	2,8
Steppes "boisées" gommeraiés	Sb	0,6	0,99	50,3
Moyennes			0,90	28,4

tableau 9.10 - Efficacité de la télédétection (zone pilote de Lekseiba)

Thèmes	Sigles	Superficies %	r	Ef
Surfaces en eau	Se	5,4	0,96	12,8
Prairies aquatiques	Pa	5,2	0,85	3,6
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	2,7	0,88	4,4
Steppes arbustives fermées	Saf	2,8	0,97	16,1
Steppes arbustives	Sa	20,1	0,88	4,4
Steppes herbeuses	Sh	21,8	0,87	4,1
Steppes arbustives denses dégradées	Sad	27,7	0,84	3,4
Sols nus	Sn	9,3	0,52	1,4
Affleurements rocheux	Af	1,4	0,99	50,3
Moyennes			0,86	11,3

En conclusion de ce paragraphe, que ce soit par l'analyse des coefficients de variation ou de l'efficacité de l'estimation par la régression par rapport à une estimation élémentaire, l'apport des données satellitaires numériques est indéniable.

Celles-ci sont indispensables pour alléger le plan de sondage et accroître la précision des estimations de superficie.

Maintenant qu'il est avéré que l'on ne peut pas faire l'économie des données satellitaires numériques dans le cadre d'un inventaire d'occupation du sol, ne pourrait-on pas toutefois éluder l'estimateur par la régression et ses calculs en utilisant dans le cadre d'une estimation rapide les résultats directement fournis par la classification ?

9.3.2. Limites des statistiques issues de la classification

Bien que l'on ait déjà remarqué que la classification n'a pas les mêmes performances pour tous les thèmes, il nous a semblé intéressant de comparer les résultats d'estimations obtenus par l'estimateur par la régression à ceux obtenus directement par comptage sur la classification.

tableau 9.11 - Validité des mesures de surfaces obtenues sur la classification (zone pilote de Rosso)

		Superficies mesurées Intervalle de confiance sur la classification à 95 p.100		
Thèmes	Sigles	ha	%	ha
Surfaces en eau	Se	669	1,6	[650 ; 703]
Cultures irriguées	Ci	341	0,8	[284 ; 329]
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	701	1,7	[688 ; 823]
St. herbeuses très claires des dépr. hydro.	Shy	7 992	19,1	[4 899 ; 5 728]
Sols nus sablo-limoneux	Sns	10 648	25,5	[10 137 ; 10 588]
Sols nus argileux	Sna	1 297	3,1	[1 576 ; 1 830]
Sables vifs	Sv	779	1,9	[599 ; 645]
St. herbeuses très claires des dunes	Shd	9 227	22,1	[10 782 ; 11 210]
St. herb. des ensablements et interdunes	Shi	7 611	18,2	[7 396 ; 8 508]
St. arbustives des ensablements	Sae	2 125	5,1	[980 ; 1 302]
Steppes "boisées" gommériaies	Sb	389	0,9	[223 ; 255]
Surface totale		41 779	100	

Pour effectuer cette comparaison, les estimations obtenues après correction par la régression sont présentées sous forme d'un intervalle de confiance calculé au risque de 5 p.100. Le comptage sur la classification est considéré comme satisfaisant s'il tombe entre les limites de l'intervalle de confiance.

Les superficies présentées ici sont issues d'un comptage des pixels sur la classification ; le pixel SPOT de 20 m de côté représente 0,04 ha. Le comptage étant exhaustif, ces superficies n'ont pas de variance mais comme la procédure de classification comporte un biais (cf. 4.3.1.4.), elles sont entachées d'une erreur inconnue. Cependant, si cette erreur est faible, il est peut-être possible d'utiliser directement le comptage des pixels sur la classification pour estimer les superficies des différents postes d'occupation du sol ?

Comme on pouvait s'y attendre, les résultats du comptage sur la classification ne "tombent" jamais très loin de l'estimation de référence, à savoir la valeur déterminée par l'estimateur par la régression. Cependant, il y a très peu de thèmes dont le comptage sur la classification est effectivement inclus dans l'intervalle de confiance à 95 p.100 déterminé à partir des résultats de l'estimation par la régression de chacun des thèmes.

A Rosso (cf. tab. 9.11), seuls trois thèmes sur onze ont un biais de classification suffisamment faible pour appartenir à la fourchette d'acceptabilité. Il s'agit des Surfaces en eau (Se), des Steppes arbustives hydromorphes (Sah) et des Steppes herbeuses des ensablements et interdunes (Shi).

tableau 9.12 - Validité des mesures de surfaces obtenues sur la classification (zone pilote de Lekseiba)

Thèmes	Sigles	Superficies mesurées Intervalle de confiance sur la classification à 95 p.100		
		ha	%	ha
Surfaces en eau	Se	2 561	6,1	[2 229 ; 2 304]
Prairies aquatiques	Pa	3 080	7,3	[2 079 ; 2 320]
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	1 178	2,8	[1 050 ; 1 176]
Steppes arbustives fermées	Saf	1 644	3,9	[1 074 ; 1 303]
Steppes arbustives	Sa	8 056	19,2	[8 060 ; 9 549]
Steppes herbeuses	Sh	9 165	21,9	[8 703 ; 9 548]
Steppes arbustives denses dégradées	Sad	9 634	23,0	[11 200 ; 12 059]
Sols nus	Sn	5 972	14,2	[3 467 ; 4 294]
Affleurements rocheux	Af	653	1,6	[592 ; 623]
Surface totale		41 943	100	

A Lekseiba (cf. tab. 9.12), un seul thème satisfait au test, les Steppes herbeuses (Sh). Il est donc à notre sens très discutable d'utiliser la cartographie d'occupation du sol pour estimer la superficie des différents postes. Encore faut-il noter que notre cartographie a le mérite d'être représentative du paysage dans la mesure où l'échantillonnage qui a servi à la réaliser est lui-même représentatif. Ce

n'est bien souvent pas le cas de nombreux travaux qui n'indiquent ni la méthode d'obtention, ni la précision de leurs estimations.

En conclusion et à la lumière des imprécisions constatées, que faut-il penser des schémas d'aménagement ou de restauration du milieu qui s'appuient sur des estimations issues d'un simple comptage des pixels classifiés ?

D'une part, ce type d'approche subjective n'est utilisé qu'en milieu tropical, naturel ou non. On ne verra jamais un service de statistiques agricoles, ayant en charge ce type de problèmes en milieu tempéré, procéder de la sorte sans pouvoir contrôler ses estimations.

D'autre part, les imprécisions constatées ne sont pas de grande ampleur, mais les zones pilotes testées sont très petites par rapport à celles qui peuvent être prises en compte dans un plan d'aménagement. De plus, les imprécisions et les erreurs commises lors de l'inventaire vont se trouver répercutées sur l'ensemble de la chaîne des travaux d'aménagement et de restauration. De ce fait, il nous paraît important d'utiliser dès le départ la méthode la plus fiable, la plus simple et la plus précise pour ne pas compromettre les étapes qui vont succéder au diagnostic du milieu.

L'analyse du paysage qui va être proposée maintenant s'appuie sur des estimations fiables qui ont été acquises, comme cela a été démontré, par une méthode d'enquête rigoureuse et contrôlable par les intéressés eux-mêmes.

9.4. INTERPRÉTATION THÉMATIQUE

L'analyse thématique présentée ici est celle que peut réaliser n'importe quel décideur à la lecture des documents cartographiques et statistiques. Dans la mesure où la carte d'occupation du sol a surtout pour vocation de localiser les contrastes et de donner une vision générale de la zone d'étude, c'est essentiellement à partir des statistiques d'occupation du sol que l'analyse va être réalisée.

Les estimations présentées dans les deux paragraphes suivants sont dites de publication. Cela signifie que les problèmes de surfaces non affectées sont réglés (cf. 9.1.1.2.) et qu'en fonction de la précision des estimations, analysées dans les précédentes sections, les chiffres publiés sont arrondis à la dizaine près.

Notons que, comme le signale Ph. Fournier¹, *«la présentation des coefficients de variation, par poste de la nomenclature, [...] est intéressante, elle*

¹FOURNIER 1986 p.45

devrait progressivement conduire les statisticiens [et les géographes] à plus de modestie dans l'établissement de la statistique [...] : pourquoi s'illusionner avec six chiffres alors que la signification réelle des mesures devrait conduire à n'en retenir que quatre ou même peut-être trois ?».

En effet, prenons l'exemple des Steppes herbeuses (Sh) à Lekseïba (cf. tab. 9.4). Lorsque les coefficients de variation indiquent que l'écart-type représente environ 10 p.100 de l'estimation calculée, soit à peu près 900 ha sur 9 000 ha, à quoi sert de publier une estimation de la forme 9 126 ha, alors que les 126 ha s'apparentent à de la fausse précision ?

Toutefois, en raison de la disparité des chiffres de superficie et de leur précision, un arrondi à la dizaine près semble être le compromis le plus satisfaisant. C'est donc celui que nous avons retenu (cf. tab. 9.13 et 9.14).

Nous avons donc choisi de présenter ces estimations avec le souci d'éviter toute fausse précision. De plus, elles sont relativisées par l'adjonction de la précision de l'estimation (Pr) en pour cent.

$$\text{Pr} = \frac{2 * \frac{\sqrt{\text{Var}(Y_{\text{reg } k})}}{\sqrt{m}}}{Y_{\text{reg } k}} * 100$$

avec :

$Y_{\text{reg } k}$ estimation par régression de la superficie du thème k au niveau de la zone pilote ;

$\text{Var}(Y_{\text{reg } k})$ variance de cette estimation ;

m nombre de segments enquêtés.

Notons pour être exact que la précision Pr associée aux estimations corrigées des tableaux 9.13 et 9.14 est une précision approchée. Elle a été calculée à partir des estimations et variances obtenues avant la ventilation des surfaces non affectées (cf. 9.1.2.2.). Ceci ne change pratiquement rien à l'ordre de grandeur que la valeur indiquée dans la colonne précision (Pr) doit suggérer (cf. tab. 9.13 et 9.14).

9.4.1. Diagnostic de l'état de l'environnement à l'issue de la saison des pluies 1987 (zone pilote de Rosso)

On notera que les valeurs de la colonne Pr se lisent en plus ou en moins de l'estimation de surface. A titre d'exemple, les Steppes "boisées" (Sb) couvrent une superficie d'environ 250 ha \pm 7 p.100.

A l'issue de la saison des pluies 1987, la description de l'occupation du sol de la zone pilote de Rosso est la suivante. Elle est le complément local de ce qu'on sait déjà de manière générale au niveau de la zone d'étude (cf. 1^{ère} partie).

tableau 9.13 - Statistiques d'occupation du sol (zone pilote de Rosso)

Thèmes	Sigles	Superficies		Pr à 95 p.100
		ha	%	%
Surfaces en eau	Se	710	1,7	4
Cultures irriguées	Ci	320	0,8	7
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	790	1,9	9
St. herbeuses très claires des dépr. hydro.	Shy	5 540	13,3	8
Sols nus sablo-limoneux	Sns	10 800	25,9	2
Sols nus argileux	Sna	1 780	4,2	8
Sables vifs	Sv	650	1,6	4
St. herbeuses très claires des dunes	Shd	11 460	27,4	2
St. herb. des ensablements et interdunes	Shi	8 290	19,8	7
St. arbustives des ensablements	Sae	1 190	2,8	14
Steppes "boisées" gomméraires	Sb	250	0,6	7
Superficie totale		41 780	100	

A la lecture de ces résultats, on constate que les thèmes supportant une faible couverture végétale sont largement dominants. Ils couvrent pratiquement les deux tiers de la zone pilote. Il s'agit des Steppes herbeuses très claires des dépressions hydromorphes (Shy), 13 p.100, des Steppes herbeuses très claires des dunes (Shd), 27 p.100, et des Steppes herbeuses des ensablements et interdunes (Shi), 20 p.100, qui, associées, représentent environ 60 p.100 de l'espace étudié.

Ensuite, les sols nus (tous types confondus) représentent à eux seuls 30 p.100 de la zone pilote. Les Sols nus sablo-limoneux (Sns) couvrent environ 26 p.100 de l'ensemble, les Sols nus argileux (Sna) 4 p.100 et les Sables vifs (Sv) 2 p.100. Notons toutefois, que d'une année sur l'autre, à la faveur d'une saison des pluies favorable, une partie des Sables vifs (Sv) est susceptible d'être recolonisée par une strate herbeuse, alors que cela semble beaucoup moins évident pour les deux autres thèmes.

On constate également que sur plus de 80 p.100 du territoire, la strate ligneuse est très clairsemée, voire absente. Le couvert ligneux (wallo plus diéri) n'est réellement significatif que sur 5 p.100 de l'espace étudié. La gomméraire dense qui s'étendait le long du fleuve Sénégal de Rosso à Boghé, sur le diéri mauritanien, ne subsiste plus qu'à l'état de trace. De même, les forêts d'*Acacia nilotica* n'existent

plus que sous forme d'îlot contracté suite à une mise en culture de zones du wallo jusque-là inexploitées.

Enfin, bien que très visibles par leur aspect compact sur la cartographie (cf. fig. 8.4), les thèmes Surfaces en eau (Se) et Cultures irriguées (Ci) ne représentent à eux deux qu'à peine plus de 2 p.100 de la zone pilote. Rappelons que ce secteur est essentiellement pastoral et que nous n'avons pas enquêté de cultures pluviales lors de la mission de terrain (cf. 7.3.2.2.), ni de cultures de décrue, mais là en raison d'un problème de calendrier agricole.

En conclusion, la zone pilote de Rosso, à l'issue de la saison des pluies 1987, est pour 75 p.100 de sa superficie caractérisée par un très faible couvert végétal. On peut donc considérer que, seul 20 p.100 de sa surface est susceptible de pouvoir accueillir des troupeaux sans trop de risque de dégradation. Cela ne peut être toutefois réellement déterminé que par une étude sur la fréquentation animale de ce secteur au cours de la saison sèche, étude couplée à un inventaire des productions pastorales du type de celui que nous n'avons pu réaliser.

9.4.2. Diagnostic de l'état de l'environnement à l'issue de la saison des pluies 1987 (zone pilote de Lekseïba)

Les phénomènes de dégradation sont aussi à Lekseïba la caractéristique essentielle du thème le plus étendu. En effet, les Steppes arbustives denses dégradées (Sad), ex brousse à *Pterocarpus lucens*, occupent presque 30 p.100 de la zone pilote. Associées aux Sols nus (Sn), qui totalisent presque 10 p.100 du secteur étudié, malgré une précision légèrement moindre, ce groupement de thèmes dégradés occupe plus du tiers de la zone pilote. On les trouve essentiellement répartis sur la rive gauche du Gorgol. Ils constituent le couvert des glacis de raccordement entre les buttes cuirassées et le wallo.

Ensuite viennent par ordre d'importance décroissant, les thèmes sur lesquels s'exerce la majorité de l'activité pastorale, à savoir les Steppes herbeuses (Sh), 23 p.100, et les Steppes arbustives (Sa), 21 p.100. Elles représentent presque 45 p.100 de la zone pilote.

Notons que cette activité est rendue possible aux abords immédiats du Gorgol en raison des puits raccordés sur la nappe. En revanche, les points d'abreuvement se raréfient puis disparaissent à mesure que l'on progresse vers les plateaux cuirassés (cf. 3.1.2.). Dans ces secteurs, la présence des troupeaux est éphémère et concentrée sur la saison des pluies pour profiter des mares temporaires. La végétation bénéficie d'une sorte de mise en défens naturelle saisonnière, surtout visible dans le sud du

Gorgol. Nous n'avons pas rencontré ce phénomène à Rosso, en raison du nombre de puits et de leur répartition permettant au troupeau de s'éloigner du fleuve (cf. 3.1.1.).

L'absence de points d'abreuvement explique, en fin de saison sèche, la présence d'une strate herbacée très peu pâturée au pied et sur les plateaux du Continental terminal, dans le sud de la zone pilote. De ce fait, l'état actuel des Steppes arbustives denses dégradées (Sad) est plus lié à une dégradation des conditions climatiques qu'à la pression humaine et animale.

tableau 9.14 - Statistiques d'occupation du sol (zone pilote de Lekseïba)

Thèmes	Sigles	Superficies		Pr à 95 p.100
		ha	%	%
Surfaces en eau	Se	2 350	5,6	2
Prairies aquatiques	Pa	2 280	5,4	6
Steppes arbustives hydromorphes	Sah	1 160	2,8	6
Steppes arbustives fermées	Saf	1 230	2,9	10
Steppes arbustives	Sa	8 740	20,8	4
Steppes herbeuses	Sh	9 460	22,6	5
Steppes arbustives denses dégradées	Sad	12 060	28,8	4
Sols nus	Sn	4 030	9,6	11
Affleurements rocheux	Af	630	1,5	3
Surface totale		41 940	100	

On notera également que le couvert ligneux est beaucoup plus important qu'à Rosso. Les trois thèmes pour lesquels les arbres et arbustes ont une présence significative totalisent plus de 25 p.100 de la zone pilote, soit cinq fois plus qu'à Rosso. Il s'agit des Steppes arbustives hydromorphes (Sah), 3 p.100, des Steppes arbustives fermées (Saf), 3 p.100, et surtout des Steppes arbustives (Sa), 21 p.100.

Enfin, les thèmes liés à la présence de l'eau, Surfaces en eau (Se) et Prairies aquatiques (Pa), occupent environ 11 p.100 du secteur étudié à la date de prise de vue. Points d'abreuvement et de pâturage, elles deviendront zones de culture quelques mois après cette prise de vue.

Pour conclure cette section, nous souhaitons insister sur le fait que ces tableaux statistiques permettent de dresser un bilan fiable et nuancé de l'état de l'environnement à l'issue de la saison des pluies 1987. Cependant, il est évident que quatre ans après cette date, les analyses et commentaires que nous pouvons faire sont

pour partie obsolètes. Ils ne sont publiés ici que pour conclure ce qui doit être l'achèvement logique de cette recherche méthodologique.

Cependant, il est plus que probable que d'un point de vue climatique les constatations qui ont été émises sur la dégradation du milieu restent valables. Le régime pluviométrique ne s'est pas radicalement amélioré depuis 1987 (cf. fig. 2.2). En revanche, avec les événements de 1989, la pression animale a dû décroître sur les secteurs d'étude. Cette influence peut être déterminante sur la régénération du couvert végétal, d'ailleurs beaucoup plus dégradé à Rosso qu'à Lekseiba. En effet, 75 p.100 de la superficie de la zone pilote de Rosso présentaient des signes de dégradation contre seulement 40 p.100 à Lekseiba.

Dans la mesure où l'on cherchait à avoir une vision pastorale de l'occupation du sol, cette étude thématique pêche par l'absence de données sur les productions pastorales. En plus des statistiques d'occupation du sol, la gestion et/ou l'aménagement d'une zone pastorale nécessitent des données fiables sur les ressources fourragères. En effet, il faut dépasser les descriptions physiologiques du type steppe herbeuse, aussi précises soient-elles, pour atteindre le niveau des potentialités fourragères et produire des documents où, par exemple, la charge animale supportable par le milieu est indiquée. Tout cela est encore pour le moment au stade de la recherche.

Nous ne pouvons conclure ce neuvième chapitre consacré aux traitements statistiques et à leurs résultats sans insister sur les points suivants. Comme il n'existe pas d'autres études que les nôtres sur nos zones pilotes, il n'a pas été possible de comparer les résultats et d'apprécier avec une source extérieure la qualité de nos estimations. Cela aurait pourtant été un critère d'évaluation fort utile.

Les seules comparaisons que nous ayons pu faire ont eu lieu entre les estimations obtenues sans la correction par la régression et les estimations ayant bénéficié de l'apport des données numériques. Cette comparaison est largement en faveur de l'utilisation de l'estimateur par la régression.

En effet, lorsque l'on compare les précisions relatives des deux estimations au moyen de leur coefficient de variation, le gain moyen de précision est très net. Cette précision moyenne passe de 38,5 p.100 à 85,5 p.100 à Rosso et de 54,5 p.100 à 88 p.100 à Lekseiba dès lors qu'il est possible de corriger les estimations par la régression.

Si l'on parle en termes d'efficacité, il aurait fallu en moyenne 28,4 fois plus de segments à Rosso et 11,3 fois plus de segments à Lekseiba pour obtenir la même précision si l'on n'avait pas eu de données satellitaires numériques satisfaisantes.

Il faut constater que les 20 segments dont nous disposons par zone d'étude sont trop peu nombreux en cas d'absence des données satellitaires numériques. A quelques exceptions près, la précision est bien trop faible pour être satisfaisante.

En mode opérationnel, il ne faut pas hésiter à échantillonner sur 30 à 60 segments par zone pilote (cf. 6.4.2.). Cela offre au moins la possibilité de se référer à la loi des grands nombres dans les calculs (!) et si le nombre des thèmes et leur répartition le permettent, d'obtenir des estimations relativement précises sur la majorité des thèmes en l'absence de prises de vue satellitaires. Cela permet également un choix plus vaste pour l'initialisation et le contrôle de la cartographie.

Donc à coût d'enquête analogue (c'est le terrain qui coûte cher pas la télédétection), l'utilisation des classifications comme correcteur de l'échantillonnage de terrain permet d'accroître la précision des résultats d'inventaire d'un facteur 28 à Rosso et 11 à Lekseiba.

Cette troisième partie avait pour but de présenter les résultats d'un inventaire d'occupation du sol aux différentes étapes de sa réalisation. Elle démontre l'intérêt d'une intégration de la télédétection dès la préparation de la mission de terrain. Cette intégration consiste essentiellement à faciliter l'analyse de la zone d'étude au moyen de classifications préparatoires.

Ces classifications permettent premièrement de stratifier automatiquement le paysage lorsque les conditions de taille et de diversité du milieu s'y prêtent. Rappelons toutefois que la multiplication des strates multiplie d'autant le nombre d'unités d'enquête et que la perte de temps qui en résulte n'est pas forcément compensée par le gain de précision obtenu par la stratification.

Elles permettent également d'analyser la structure du parcellaire thématique, végétal ou non, donc de lui adapter au mieux la taille de l'unité d'enquête. De même sur le terrain, les classifications automatiques préparatoires guident l'opérateur en lui indiquant combien il a de thèmes à enquêter sur l'ensemble des segments, combien de fois ils vont être présents dans l'échantillon et où les enquêter.

Ensuite, de retour au laboratoire, ces classifications automatiques préparatoires vont permettre de fiabiliser le dépouillement et l'initialisation des traitements en guidant, là aussi, l'opérateur lors du sondage déterminant les proportions d'occupation du sol au niveau des segments et plus tard, lors du sondage de contrôle des classifications. Enfin, elles permettent de sélectionner les parcelles d'initialisation qui vont servir à réaliser les classifications supervisées dont le but est de fournir l'élément correcteur des régressions et, après finalisation, les cartographies d'occupation du sol.

Pour que toutes ces étapes s'enchaînent et permettent l'édition des statistiques dont la fiabilité et la précision ont été décrites au chapitre 9., il est impératif de disposer de données satellitaires numériques pour réaliser les deux séries de classifications. Est-il indispensable de disposer de deux dates de prises de vue, une pour la classification automatique préparatoire et l'autre pour la classification supervisée ?

Dans le cas d'un simple inventaire d'occupation du sol, les données satellitaires doivent simplement être récentes et correspondre à la période d'enquête, sinon une dérive inconnue va se produire entre ce qui est vu sur le terrain et les données satellitaires. Notons que ces données vont servir deux fois, d'abord sous forme d'une classification automatique pour aller sur le terrain, puis après la mission en permettant une classification supervisée. Il est donc préférable de disposer de deux séries de données si l'occupation du sol subit une mutation rapide, car le dépouillement va être rendu complexe et les classifications supervisées de plus en plus inexactes en raison de la dérive du paysage. Sinon, une seule série de données doit suffire.

En revanche, en cas de quantification des ressources pastorales, il faut impérativement deux séries de données. La première doit répondre aux mêmes caractéristiques que précédemment pour préparer l'inventaire d'occupation du sol et l'autre doit être enregistrée en fin de saison des pluies, simultanément avec la mission de terrain pour obtenir les meilleurs corrélations entre prélèvements herbacés et données radiométriques.

Donc, comme nous l'avons démontré tout au long de cette troisième partie, pour obtenir une cartographie et des statistiques fiables et précises, il est préférable de respecter un protocole qui ne laisse que peu de place au hasard. Ceci peut paraître contraignant, mais limite les risques d'erreur.

En effet, dans la mesure où l'opérateur sait plus ou moins où il peut échantillonner à l'intérieur des unités d'enquête, cela a déjà été analysé en laboratoire avant le départ, il peut se concentrer d'une part sur la meilleure façon de localiser et collecter l'information et d'autre part sur la collecte proprement dite. Les erreurs d'observation sont ainsi réduites d'autant.

Assurant une représentativité satisfaisante de la zone d'étude et malgré quelques imperfections liées à la phase de mise au point, le sondage par la méthode des segments carrés s'est montré tout à fait adapté aux inventaires d'occupation du sol en milieu naturel sahélien. Nous en voulons pour preuve les résultats d'inventaire dont la précision moyenne dépasse les 85 p.100.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette recherche s'inspire des méthodes d'inventaire expérimentées depuis quelques années en zone agricole tempérée. Son objectif est d'adapter au milieu naturel tropical sec une analyse de l'occupation du sol reposant sur la représentativité, la "réitérabilité", la simplicité, la fiabilité et la précision des estimations de superficies. Au-delà d'une simple acclimatation au milieu naturel tropical, cette recherche méthodologique se propose d'étudier les avantages qu'il est possible d'attendre d'une utilisation conjointe de la télédétection et de l'enquête de terrain dans les inventaires d'occupation du sol. Nous avons testé cette recherche en zone sahélienne du sud de la Mauritanie.

La méthode d'inventaire proposée repose sur le principe d'un échantillonnage aréolaire aléatoire de la zone d'étude. Les unités d'enquête, appelées segments, ont toutes la même superficie, leur répartition est effectuée par tirage systématique non aligné que l'on peut qualifier de "systématique et aléatoire". C'est à l'intérieur de ces segments que vont être effectuées les observations du milieu.

Le segment sert de référence pour tous les calculs et traitements. Il est aussi bien utilisé pour déterminer la proportion d'occupation du sol lors du dépouillement des fiches d'enquête que pour sélectionner les parcelles qui vont servir à initialiser les traitements. Les segments sont les seules portions de territoire qui soient enquêtées et donc connues. Entre eux, en théorie, nous ne savons rien.

Cependant, leur répartition aléatoire permet d'extrapoler à l'ensemble de la zone d'étude les estimations qui ont pu être faites à leur niveau et cela grâce aux lois statistiques qui s'appliquent à ce type d'échantillons. Sur le même principe, les paramètres des classifications sont d'abord établis sur les segments, puis appliqués à l'ensemble de la zone d'étude. Ils offrent ainsi la vision globale que l'échantillon ne peut offrir sans la télédétection.

Dans la phase préparatoire de l'inventaire d'occupation du sol, l'apport de la télédétection est multiple. Très souvent en milieu tropical, c'est la seule façon d'obtenir des documents d'enquête récents qui permettent de se déplacer et de se localiser sur le terrain, de servir de base de sondage, de positionner l'échantillon et de servir de fiche d'enquête. De plus, par une analyse préparatoire de l'enquête, la télédétection permet aussi de déterminer la physionomie et la structure du paysage, donc d'adapter le plan de sondage au milieu à inventorier.

Ensuite lors des phases de laboratoire, l'imagerie satellitaire numérique fiabilise largement le dépouillement des fiches d'enquête, aide à la sélection des parcelles d'initialisation et enfin permet de réaliser des classifications qui vont donner d'une part une cartographie et d'autre part une statistique d'occupation du sol.

Il faut noter à ce sujet que cette statistique d'occupation du sol, issue d'un comptage sur la classification, ne peut pas fournir à elle seule les estimations de

superficies des différentes catégories, et cela quelle que soit la méthode d'échantillonnage, car elle est biaisée dans une proportion inconnue. Or si l'on souhaite des estimations fiables, ce biais est réhibitoire.

Cependant, les statistiques issues de la classification peuvent être utilisées pour corriger les estimations obtenues sur le terrain. C'est ici que la complémentarité entre l'enquête de terrain et la télédétection est la plus flagrante.

En effet, le sondage aléatoire se prête à des traitements améliorant son efficacité. L'enquête de terrain peut être corrigée par le résultat des classifications effectuées à l'aide des données satellitaires. Cette correction consiste à établir une régression au niveau des segments entre les résultats d'enquête de terrain et ceux des classifications, cela thème par thème. Les différents paramètres de cette régression servent ensuite à redresser les estimations issues de l'enquête de terrain.

Après correction des estimations issues de l'enquête de terrain, on constate que pour obtenir une précision équivalente sans l'apport de l'imagerie satellitaire, il faudrait enquêter 28 fois plus de segments pour la zone pilote de Rosso et 11 fois plus pour la zone pilote de Lekseiba. Dans les deux cas, la précision sur l'ensemble des postes d'occupation du sol est égale ou supérieure à 85 p.100.

En résumé, le principal avantage des inventaires par sondage aléatoire est de fournir une estimation non biaisée des superficies des différentes catégories d'occupation du sol et la précision de cette estimation. Cependant, en l'absence de données satellitaires et pour des thèmes compacts et de faible étendue, cette méthode offre des estimations de superficie peu précises. L'estimation par la régression est donc une solution adaptée à une recherche de précision pour ce type d'inventaire, surtout si l'on ne veut pas multiplier à l'infini le nombre des unités d'enquête.

Ces méthodes d'inventaire ne comportent pas que des avantages. Par rapport à une méthode par choix raisonnés, elles requièrent un temps de préparation plus important (il faut réaliser le plan de sondage, etc.), de même la phase de terrain risque d'être plus longue. En effet, pour assurer une certaine représentativité à l'échantillon de segments, il faut quand même compter avec un taux de sondage qui oscille autour de 1 p.100 suivant la complexité du paysage, cela peut être très lourd à gérer. Ce taux est fonction du nombre et de la taille des unités d'enquête. Ces deux paramètres sont déterminés de manière très pragmatique, essentiellement par le temps dont on dispose sur le terrain et dans une moindre mesure par la physionomie du paysage.

Nous avons pour notre part inventorié 20 segments de 36 ha par zone d'étude de 40 000 ha. A l'usage, surtout en l'absence de données satellitaires, ce nombre s'est révélé trop faible pour assurer une précision satisfaisante de l'estimation de superficie de l'ensemble des thèmes. Il aurait probablement été préférable

d'inventorier 30 segments de 25 ha, mais à raison d'une moyenne de trois segments par jour, le risque de ne pouvoir tous les enquêter était trop élevé.

En effet, contrairement aux méthodes traditionnelles d'inventaire, basées sur un échantillonnage par choix raisonnés, le principe du tirage aléatoire repose sur une sélection d'unités d'enquête tirées au hasard, où chaque unité a une probabilité non nulle et connue d'être choisie.

Cela signifie que pour conserver l'équiprobabilité du tirage, dès la réalisation du plan de sondage, il faut disposer d'une couverture satellitaire complète de la zone d'enquête pour que chaque partie du territoire puisse être sélectionnée dans l'échantillon. Ensuite, il faut s'assurer que chaque unité statistique tirée est accessible, c'est une des conditions du sondage aléatoire. On comprend mieux, dès lors, l'importance du milieu d'accueil dans cette procédure par rapport à celle du choix raisonné où l'on se contente, en général, d'un échantillon restreint et collecté le long de la piste, là où il n'y a pas de problème d'accessibilité.

En revanche, le sondage aléatoire impose de pouvoir se rendre partout pour collecter des informations. Certains paysages se prêtent moins bien que d'autres à ce type d'enquête. Qu'en est-il du Sahel sud-mauritanien ?

Il semble que cette approche méthodologique soit encore plus adaptée au milieu sahélien que tempéré. En effet, la présence nuageuse, principale contrainte climatique liée à la saison des pluies pour les prises de vue satellitaire, est très faible au Sahel en raison d'une courte saison des pluies. Pour étudier l'occupation du sol de ces secteurs, il semble qu'une seule prise de vue programmée sur septembre-octobre offre de bonnes garanties d'obtenir d'une part les productions pastorales à leur optimum et d'autre part les cultures pluviales.

Toutefois, nous n'avons pas abordé les problèmes de discrimination entre les cultures sous pluies et le reste de la végétation naturelle, car nos zones d'étude étaient situées plus au nord que l'isohyète 400 mm, limite en deçà de laquelle les cultures sous pluies sont plus qu'aléatoires. De ce fait, cette catégorie d'occupation du sol n'était présente qu'à l'état de traces dans le paysage, nous l'avons donc ignorée. Cet aspect reste donc à étudier et pourrait nécessiter plus d'une image pour assurer la discrimination entre toutes les formes de végétation de fin de saison des pluies.

En ce qui concerne les cultures de décrue, il est nécessaire de recourir à une image de saison fraîche, c'est-à-dire janvier-février. Il est probable que l'on obtiendrait alors en plus des cultures de décrue une partie du maraîchage.

Ajoutons à tout cela que cette méthode d'inventaire est adaptée aux milieux ouverts de type sahélien. En effet, il est facile d'y circuler car il y a relativement peu d'accidents géologiques et de zones hydromorphes. De plus la faiblesse du couvert

végétal ne pose pas de problèmes insurmontables de pénétration. Le repérage et l'accès sont pratiquement toujours possibles. Le Sahel sud-mauritanien peut donc être considéré comme un milieu suffisamment ouvert pour y développer ce type d'inventaire. Enfin, ce n'est pas le mode d'occupation humaine, très lâche, qui risque d'entraver la circulation à quelques périmètres irrigués près.

Comme le souligne G. Saint¹, pour accéder à l'opérationnalité recherchée, «*il faut insister sur les points suivants, indispensables pour assurer la bonne qualité des résultats ainsi que leur utilisation efficace ...*» :

- très forte intégration de l'enquête de terrain et de la télédétection ;
- prise en compte du risque d'absence de données satellitaires en sélectionnant un taux de sondage et un nombre de points d'enquête minimum pour assurer un certain seuil de précision ;
- pragmatisme et phases d'essai quant au choix de la taille et du nombre d'unités d'enquête, des dates de prise de vue et de mission, etc.

Ces quelques pages consacrées aux aspects techniques de l'inventaire démontrent que la plupart des objectifs de représentativité, de "réitérabilité", de simplicité, de fiabilité et de précision peuvent être atteints par la méthode développée ici. Avant d'envisager les perspectives d'application, nous allons rappeler les différents points qui à nos yeux devraient encore être testés et améliorés pour permettre l'opérationnalité recherchée.

Tout d'abord, il paraît important de tester cette méthodologie sur des milieux comportant plus de contraintes liées à la présence d'un couvert ligneux plus dense et/ou à une proportion de cultures plus élevée. En effet, notre expérience de ces contraintes dans le Sahel sud-mauritanien est trop limitée.

De même, il faut poursuivre les recherches en géostatistique et plus particulièrement celles sur l'analyse de la taille du parcellaire. L'adaptation de la taille du segment au parcellaire nécessite la mise au point d'une méthode plus simple, plus fiable et plus précise que celle présentée ici.

Ensuite, il serait très instructif de réaliser ce type d'inventaire sur des unités de gestion de plus grande taille, proche par exemple de la taille moyenne d'une association pastorale, pour découvrir les problèmes, voire les limites, liés à

¹SAINT 1988 p.250

l'accroissement de la taille de la zone d'étude : nombre d'enquêteurs, contrôle de leur travail, lourdeur du plan de sondage, etc.

Enfin, alors que les événements de 1989 nous en ont empêché, il faut mettre en pratique la phase d'enquête concernant la quantification des productions pastorales ou agricoles. Seule celle-ci peut nous permettre de passer à la gestion des parcours et du milieu. De plus, lorsqu'elle sera couplée à un inventaire du cheptel fréquentant la zone d'étude, il sera possible d'apprécier la sur ou sous-exploitation du milieu pour la saison sèche à venir. Encore faudra-t-il que les problèmes de délais de "livraison" de l'information, de discrimination des cultures et de localisation soient maîtrisés.

Il convient maintenant de s'interroger sur l'utilité d'une telle démarche d'inventaire si elle continue d'être ponctuelle dans le temps et dans l'espace et de surcroît téléguidée de France. Le véritable objectif à atteindre est de pouvoir effectuer rapidement un transfert méthodologique vers les services des pays hôtes.

En l'absence d'unités de gestion décentralisées, les services de l'élevage des pays sahéliens semblent être les interlocuteurs privilégiés pour ce type de transfert. N'oublions pas que dans toute politique de Recherche-Développement, il doit y avoir un volet formation. Celui-ci restera somme toute léger, car comme nous l'avons vu les techniques à mettre en œuvre sont accessibles et le matériel informatique requis peut être un simple micro-ordinateur ; ces derniers sont de plus en plus puissants et suffisent à traiter les images, les données floristiques, etc..

De même, moyennant quelques contrôles supplémentaires et peut-être quelques adaptations, les services de statistiques agricoles devraient, à l'instar de leurs homologues européens, tirer profit de l'utilisation de ce type d'inventaire, d'autant plus que dans le cas de la Mauritanie, ils disposent de personnels compétents et de matériels.

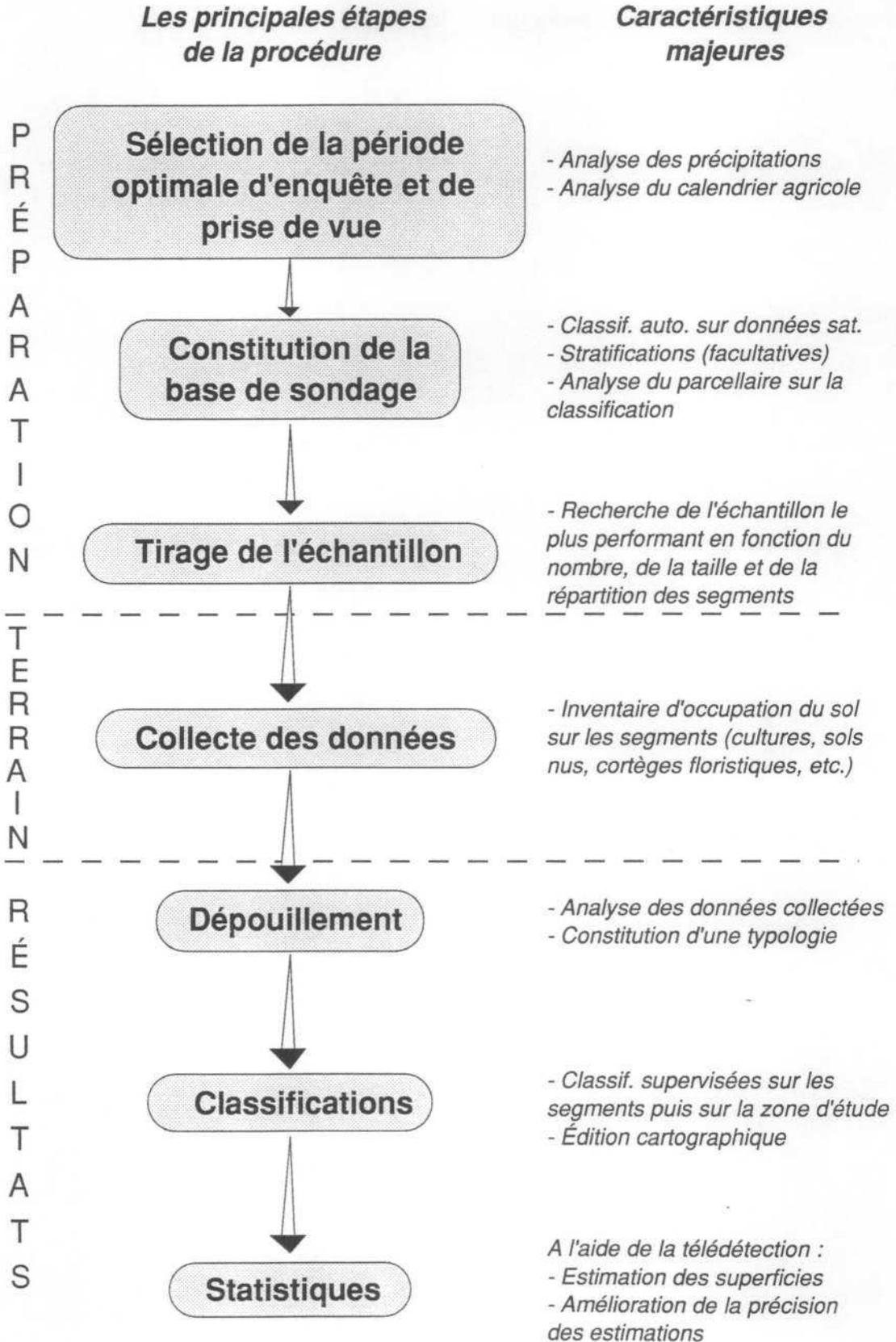
En conclusion, l'inventaire d'occupation du sol par télédétection et enquête de terrain, tel que nous l'avons décrit, devrait être bénéfique à au moins deux types d'utilisateurs : les "décideurs" et les agro-éleveurs.

Les décideurs, car ceux-ci disposeront ainsi d'un outil fiable de planification, à peu près indépendant des pressions et appréciations hautement subjectives lorsqu'il s'agit de sujets sensibles comme l'extension des superficies irriguées ou "l'avancée du désert". De plus, la maîtrise de ce type d'outil est un pas de plus vers l'indépendance par le biais du contrôle des productions pastorales, agricoles, etc.

Les agro-éleveurs, car lorsque l'on sait que le bétail peut avoir un rôle amplificateur vis-à-vis de la désertification, les mauvaises années il faut pouvoir

"déstocker" le trop plein de bétail, mettre en réserve certains secteurs vulnérables ou pour constituer des réserves, etc. Pour cela, il est préférable de maîtriser les outils de diagnostic adaptés à l'échelle de gestion. Et même si d'un point de vue comportemental, les éleveurs sahéliens sont encore loin de rivaliser avec les capacités d'adaptation de leurs homologues australiens, les outils de gestion sont prêts, mais alors la rigueur de la procédure d'inventaire ne doit pas rester l'apanage des pays développés, nous nous y sommes appliqué.

figure 10.1 - Synthèse de la procédure d'inventaire préconisée en milieu tropical sec



ANNEXE 1

Disponibilité et coût des prises de vue

tableau A.1.1 - Disponibilité catalogue de l'imagerie satellitaire

ROSSO	LANDSAT								SPOT							
	août		septembre		octobre		novembre		août		septembre		octobre		novembre	
	<10	>10	<10	>10	<10	>10	<10	>10	<10	>10	<10	>10	<10	>10	<10	>10
1972				1				1								
1973						1										
1977								1								
1980			1			1		1								
1984	1		1		3		2	1								
1985			1		1											
1986	3		2		1	2	2				2		1	1	5	
1987	1		1		1	1	1	+2		1	1	2	1	1	2	1
1988			1		2	2	+1	1		1	1			1		
1989	1			2	2								1		1	

LEKSEIBA

1972								1								
1973			1													
1977								1	1							
1978			1			1										
1979								1								
1980						2		1								
1984	2		4		3			3								
1985	1			1		1		2								
1986		1	1	1	2			2			1					
1987					1			1	+2		2		1	1	2	2
1988			1	+1	1	+1	1	1	+1	1		1	1			1
1989	1							1			1	1		1		1

KIFFA

1980			1		2			1								
1984	2	1	4		3			2								
1985	2		2		1			1								
1986	2			2	3			2								
1987	2			1	1	1		1	+1							
1988		1		1					1	1						
1989		1	1		2						1					1

Sources GDTA pour les images Landsat, SPOT IMAGE pour les images SPOT

CN Couverture Nuageuse, inférieure ou égale à 10 p.100 (<10) ou supérieure (>10).

2 +1 Pour Landsat, le chiffre justifié à gauche (2) indique le nombre de scènes MSS, celui justifié à droite (1) les scènes TM. Il y a autant de scènes TM simultanées avec des MSS que de "+". Pour SPOT, seuls les enregistrements multispectraux sont comptabilisés.

tableau A.1.2 - Coût d'acquisition des prises de vue

Photographies aériennes panchromatiques : tirages papier

Echelles	Prises de vue au catalogue(1)			Prises de vue sur commande(2)		
	1/12500	1/25000	1/50000	1/12500	1/25000	1/50000
Surf./unité (en km ²)	2,9*2,9	5,75*5,75	11,5*11,5	2,9*2,9	5,75*5,75	11,5*11,5
Coûts par unité image	50,00			700	1 400	4 300
Coûts au km ²	6,05	1,51	0,38	281,7	142,6	109,6
Coûts pour une surf. de 60*60 km ² (compatible SPOT)	71 900	18 000	4 500	1,01E+06	513 500	394 500
Coûts pour une surf. de 185*185 km ² (compatible Landsat)	684 400	171 100	42 400	-	-	-

Données numériques

Capteurs	SPOT				TM			MSS
	Panchromatique (P)		Multispectral (XS)		Scène entière		1/4 de sc.	
Surf./unité (en km ²)	60 * 60		60 * 60		185 * 185		92,5*92,5	185*185
Programmation	sans	avec	sans	avec	sans	avec	sans	sans
Coûts par unité image	14 900	17 900	11 700	14 700	24 600	26 400	12 300	4 100
Coûts au km ²	4,14	4,97	3,25	4,08	0,72	0,77	1,44	0,12
Coûts au km ² pour 10 km ² utilisés (type zone d'oasis)	1 490	1 790	1 170	1 470	2 460	2 640	1 230	410
Coûts au km ² pour 400 km ² utilisés (type zone pastorale)	37,25	44,75	29,25	36,75	61,50	66,00	30,75	10,25

Sources IGN, SPOT IMAGE et GDTA.

Les prix sont hors taxes et exprimés en Francs français au 1er septembre 1990. Pour les produits Landsat, les taxes du GDTA sont incusées (+ 30 %) et le Dollar à 5,25 FF.

Pour faciliter les comparaisons, les tarifs correspondent à des produits standards, sans corrections géométriques, etc. Pour SPOT, le tarif correspond au niveau de traitements 1A ou 1B.

(1) d'après le tarif en vigueur à la photothèque de l'IGN à St. Mandé, soit 50 FF par cliché noir et blanc.

(2) d'après devis IGN (oct. 90). Tarifs moyens calculés sur plusieurs zones de 3 600 km². Ces prix comprennent la participation à la mise en place de l'avion soit 140 000 FF par site de 60*60 km².

- données non fournies.

Annexe 1 - Disponibilité et coût ...

ANNEXE 2

Les paramètres images

tableau A.2.1 - Caractéristiques satellitaires et radiométriques de la zone pilote de Rosso

Référence de la scène SPOT : KJ 023-317

Date de prise de vue : 6 novembre 1987

Taille de la zone pilote : 1 024 pixels * 1 024 pixels, soit 20,48 km * 20,48 km

Coordonnées du coin NW de la zone pilote (en pixels) : (x ; y) = (400 ; 540)

Matrice des corrélations

	XS3	XS2	XS1	IV	IB	F1	F2
XS3	1						
XS2	0,74	1					
XS1	0,19	0,62	1				
IV	-0,43	-0,92	-0,71	1			
IB	0,94	0,93	0,42	-0,71	1		
F1	0,89	0,96	0,56	-0,77	0,99	0,99	
F2	-0,41	0,17	0,81	-0,44	-0,14	0,01	1

Paramètres statistiques

	XS3	XS2	XS1	IV	IB	F1	F2
Maximum	132	128	117	199	183	255	255
Moyenne	96,7	88,8	77,9	111	131,5	124,6	128,6
Minimum	38	29	40	73	65	0	0
Ecart type	11,5	11,2	8,3	10,8	14,7	41,5	39,9
Coef. de Var.	11,9	12,6	10,7	9,8	11,2	33,3	31,1
Etendue	94	99	77	126	118	255	255

tableau A.2.2 - Caractéristiques satellitaires et radiométriques de la zone pilote de Lekseiba

Référence de la scène SPOT : KJ 028-318

Date de prise de vue : 22 octobre 1987

Taille de la zone pilote : 1 024 pixels * 1 024 pixels, soit 20,48 km * 20,48 km

Coordonnées du coin NW de la zone pilote (en pixels) : (x ; y) = (965 ; 240)

Matrice des corrélations

	XS3	XS2	XS1	IV	IB	F1	F2
XS3	1						
XS2	0,6	1					
XS1	0,53	0,93	1				
IV	-0,26	-0,93	-0,87	1			
IB	0,92	0,86	0,79	-0,62	0,99		
F1	0,87	0,91	0,86	-0,69	0,99	0,99	
F2	-0,5	0,39	0,45	-0,69	-0,12	-0,01	1

Paramètres statistiques

	XS3	XS2	XS1	IV	IB	F1	F2
Maximum	109	101	101	190	147	255	255
Moyenne	83,3	70,3	69,3	128,9	109,3	128,9	119,4
Minimum	26	30	41	100	43	0	0
Ecart type	12,1	10,5	7,4	12,8	14,1	42,3	41
Coef. de Var	14,5	15	10,7	10	12,9	32,8	41
Étendue	83	71	60	90	104	255	255

tableau A.2.3 - Caractéristiques satellitaires et radiométriques de la zone pilote des oasis

Référence de la scène SPOT : KJ 031-317

Date de prise de vue : 24 décembre 1987

Taille de la zone pilote : 512 pixels * 512 pixels, soit 10,24 km * 10,24 km

Coordonnées du coin NW de la zone pilote (en pixels) : (x ; y) = (2 306 ; 2 156)

Matrice des corrélations

	XS3	XS2	XS1	IV	IB	F1	F2
XS3	1						
XS2	0,92	1					
XS1	0,59	0,74	0,99				
IV	-0,78	-0,96	-0,76	1			
IB	0,94	0,93	0,42	-0,71	1		
F1	0,95	0,97	0,74	-0,88	0,98	1	
F2	-0,24	0,03	0,64	-0,2	-0,11	-0,02	0,99

Paramètres statistiques

	XS3	XS2	XS1	IV	IB	F1	F2
Maximum	135	138	95	173	193	255	255
Moyenne	97,6	97,2	73,2	101,6	137,8	128,2	123,6
Minimum	55	39	41	74	77	0	0
Ecart type	6,8	7,2	4,4	5,7	9,7	41	40,2
Coef. de Var.	7	7,4	6	5,6	7,1	32	32,5
Etendue	80	99	54	99	116	255	255

ANNEXE 3

Les précipitations

Les données pluviométriques présentées proviennent de deux organismes différents. Pour la période antérieure à 1982, les données pluviométriques ont été gracieusement fournies par le laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM de Montpellier. Après 1982, elles ont été relevées au bureau de l'AGRHYMET de Nouakchott.

Certaines données sont manquantes, elles ont été laissées en blanc. La sommation de l'année concernée (tableaux des précipitations mensuelles) est donc probablement inférieure au total réel.

tableau A.3.1 - Précipitations mensuelles à Rosso (1940-1989)

Années	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Total
1940	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	55,3	19,9	104,9	15,5	0,0	0,0	196,6
1941	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,2	6,6	81,2	0,0	0,0	0,0	106,0
1942	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	196,6	20,7	0,0	10,8	0,0	235,6
1943	0,0	7,4	0,0	1,0	4,0	7,0	63,1	111,4	116,7	40,8	0,0	22,9	374,3
1944	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	55,7	161,9	84,5	34,7	0,0	0,0	343,2
1945	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48,3	36,9	90,7	4,6	0,0	0,0	180,5
1946	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,1	22,8	35,9	49,9	13,7	0,0	0,0	136,4
1947	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,7	498,3	101,8	0,0	0,0	0,0	611,8
1948	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	40,2	141,5	37,1	28,4	0,0	0,0	247,4
1949	0,0	0,0	0,0	0,0	6,5	0,0	57,8	202,5	64,0	48,5	4,0	0,0	383,3
1950	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,4	34,5	110,3	85,1	50,0	0,3	0,0	287,6
1951	0,0	4,7	0,0	0,0	3,2	13,3	26,9	40,0	76,5	114,6	18,1	0,0	297,3
1952	0,0	0,0	0,0	0,0	13,0	8,8	107,3	80,5	151,5	106,4	0,1	0,0	467,6
1953	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	29,5	58,0	121,5	130,2	56,2	0,0	0,0	397,4
1954	0,0	10,0	0,0	0,0	0,6	1,8	25,1	182,5	22,3	4,7	0,0	0,0	247,0
1955	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	52,5	90,4	143,8	87,8	15,4	0,0	0,0	392,7
1956	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	25,2	124,9	140,4	2,2	0,0	56,4	349,5
1957	5,0	0,6	0,0	0,0	0,0	1,2	24,9	177,7	36,0	104,7	9,7	2,5	362,3
1958	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	33,0	198,7	6,5	3,4	0,0	0,0	257,1
1959	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,2	23,3	56,2	67,3	0,0	0,0	0,0	163,0
1960	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	84,1	85,2	145,1	5,3	0,2	0,0	319,9
1961	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	8,2	92,0	32,9	182,6	2,5	0,0	0,0	319,9
1962	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	4,0	11,5	131,4	15,4	57,2	0,0	0,0	219,6
1963	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	57,5	42,1	63,6	90,7	0,0	0,0	255,5
1964	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	47,8	200,7	65,9	10,3	0,0	0,0	327,8
1965	4,0	8,6	0,0	0,0	0,0	19,2	67,2	94,0	95,4	9,3	0,0	0,0	297,7
1966	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	6,7	45,0	97,2	33,2	84,7	0,0	1,1	273,9
1967	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37,9	99,2	23,2	128,6	19,2	0,0	0,0	308,1
1968	0,0	11,0	0,0	2,0	0,0	11,0	37,0	60,0	68,0	1,0	0,0	0,0	190,0
1969	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,0	158,0	44,0	44,0	0,0	0,0	341,0
1970	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	48,0	62,0	0,0	0,0	0,0	150,0
1971	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,0	83,0	17,0	0,0	0,0	0,0	126,0
1972	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	1,0	1,0	25,0	8,0	0,0	0,0	54,0
1973	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	15,0	89,0	60,0	0,0	0,0	0,0	166,0
1974	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,0	88,0	18,0	4,0	0,0	0,0	127,0
1975	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	117,0	108,0	91,0	12,0	0,0	1,0	329,0
1976	0,0	7,0	1,0	0,0	0,0	2,0	31,0	60,0	135,0	0,0	0,0	13,0	249,0
1977	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	37,0	86,0	0,0	0,0	0,0	124,0
1978	1,0	0,0	0,0	2,0	4,0	16,0	44,0	75,0	178,0	5,0	0,0	0,0	325,0
1979	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	24,0	44,0	157,0	77,0	12,0	0,0	0,0	326,0
1980	0,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	125,0	79,0	1,0	0,0	0,0	222,0
1981	4,0	0,0	7,0	0,0	0,0	0,0	122,0	66,0	62,0	2,0	0,0	0,0	263,0
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,0	107,0	21,0	0,0	0,0	0,0	166,0
1983	0,0	0,5	3,7	0,0	2,2	0,0	3,2	21,8	5,2	0,0	0,0	0,0	36,6
1984	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,6	0,0	8,7	59,7	0,5	0,0	0,0	79,5
1985	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	44,0	62,9	55,9	0,0	0,0	0,0	163,3
1986	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	11,0	126,9	191,2	0,0	0,5	2,4	334,4
1987	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,4	23,5	51,5	102,0	11,0	0,0	0,0	197,4
1988	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	18,7	123,9	112,1	0,0	0,0	0,0	255,7
1989	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,7	51,2	151,5	18,5	0,0	0,0	0,0	246,9

tableau A.3.2 - Précipitations mensuelles à Kaédi (1940-1989)

Années	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Total
1940	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,0	41,2	282,5	35,1	33,0	0,0	0,0	408,8
1941	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3	37,0	23,5	139,0	3,2	0,0	0,0	205,0
1942	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	88,4	111,7	63,5	19,8	0,0	0,0	292,4
1943	0,0	2,1	0,0	0,0	2,2	26,0	88,7	196,5	184,7	5,2	0,0	31,8	537,2
1944	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,9	39,4	109,0	71,0	61,0	13,0	0,0	300,3
1945	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	301,0	80,4	122,0	0,0	0,0	0,0	503,4
1946	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	99,0	95,3	43,0	7,2	0,0	0,0	248,5
1947	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	34,7	202,9	135,4	0,0	41,0	0,0	415,0
1948	0,0	0,0	0,0	0,0	7,1	66,1	81,3	196,4	61,5	6,8	0,0	0,0	419,2
1949	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	4,7	83,7	86,2	12,3	3,6	0,0	7,7	202,2
1950	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,5	48,0	276,0	141,0	27,0	0,0	0,0	509,5
1951	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	89,5	145,0	78,0	109,0	0,0	0,0	439,5
1952	6,0	0,0	0,0	3,0	13,0	60,0	52,4	162,0	163,0	27,0	0,0	0,0	486,4
1953	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,0	81,0	154,0	61,0	20,0	0,0	0,0	337,0
1954	2,0	41,0	0,0	0,0	0,0	13,0	56,0	120,9	55,0	6,6	51,0	0,0	345,5
1955	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,0	147,0	144,0	63,0	15,3	0,0	0,0	402,3
1956	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,8	46,5	157,4	184,5	65,8	0,0	1,2	467,2
1957	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44,2	25,9	163,9	102,4	14,8	0,0	0,0	351,2
1958	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	11,4	132,0	284,4	32,6	0,0	0,0	0,0	460,9
1959	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	133,7	66,4	273,1	72,1	0,0	0,0	0,0	545,3
1960	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			23,0	277,0	0,0	0,0	0,0	300,0
1961	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0	0,0	46,4	185,0					246,4
1962						12,0	169,0	186,0					367,0
1963			0,0		0,0	27,8	69,9	115,3	36,6	62,4	0,0	0,0	312,0
1964	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,0	217,5	192,0	93,0	0,5	0,0	0,0	514,0
1965	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	64,8	163,5	98,1	115,7	16,7	2,2	0,0	461,0
1966	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	40,2	0,0	74,1	126,5	84,4	0,0	0,0	329,2
1967	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23,5	44,7	138,7	167,7	22,0	0,0	0,0	396,6
1968	0,0	30,0	0,0	0,0	0,0	9,4	17,0	10,6	108,6	0,0	0,0	0,0	175,6
1969	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	160,9	59,4	59,0	34,5	0,0	0,0	313,8
1970	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	57,2	55,7	118,7	76,7	0,0	0,0	0,0	308,3
1971	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,6	120,6	74,1	0,0	0,0	0,0	231,3
1972	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	27,4	8,6	59,7	21,5	9,7	0,0	0,0	130,0
1973	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	24,3	133,4	60,3	0,0	0,0	0,0	218,4
1974	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,3	119,0	186,0	75,4	23,1	0,0	0,0	419,8
1975	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,6	183,7	91,3	20,0	0,0	0,0	0,0	300,6
1976	17,7	0,2	0,0	0,0	4,0	3,5	95,3	84,1	27,8	0,6	0,4	1,6	235,2
1977	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	9,7	51,5	102,0	56,8	0,0	0,0	0,0	220,2
1978	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27,6	54,3	11,8	95,0	12,0	13,2	0,5	214,4
1979	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0	15,4	47,7	80,7	39,0	12,6	0,2	0,0	202,7
1980	0,0	4,1	0,0	0,0	0,0	11,3	79,6	172,8	16,0	3,0	0,0	2,5	289,3
1981	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	1,9	67,7	71,6	89,4	5,7	0,0	0,0	239,0
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	97,6	112,4	0,0	0,0	0,0	0,0	215,9
1983	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,4	15,7	54,2	85,6	0,0	0,0	0,0	175,9
1984	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	43,6	65,2	40,1	37,4	39,0	0,0	0,0	228,4
1985	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	58,4	73,1	37,8	3,8	0,0	15,9	190,0
1986	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	33,1	36,0	157,0	4,5	0,0	0,0	231,4
1987	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	68,5	34,1	71,6	100,7	8,6	0,0	0,0	283,5
1988	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,9	118,8	149,9	5,0	0,0	0,0	306,6
1989	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	93,2	163,4	41,7	14,4	0,0	0,0	322,7

tableau A.3.3 - Précipitations mensuelles à Kiffa (1940-1989)

Années	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Total
1940	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	18,0	84,9	143,7	50,0	26,5	0,0	0,0	329,1
1941	0,0	0,0	0,0	0,0	6,9	13,6	76,7	23,5	35,5	0,0	0,0	0,0	156,2
1942	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	0,0	75,0	52,0	12,5	5,5	5,0	0,0	157,0
1943	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,0	36,7	157,6	173,2	10,0	0,0	21,0	437,5
1944	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	56,2	49,4	44,0	13,5	0,0	0,0	167,1
1945	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	5,5	112,0	146,0	107,0	16,0	0,0	0,0	390,0
1946	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	70,4	108,5	32,7	0,0	0,0	0,0	211,6
1947	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	31,6	111,8	113,2	0,0	0,0	0,0	263,9
1948	0,0	1,2	0,0	0,0	22,0	97,0	53,0	206,0	75,0	1,5	0,0	0,0	455,7
1949	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	58,8	131,0	65,0	0,0	0,0	37,0	294,3
1950	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	16,0	130,0	99,5	144,0	13,1	0,0	0,0	406,6
1951	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0	31,8	98,9	69,0	87,0	193,4	0,0	0,0	482,4
1952	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	31,4	92,1	133,5	180,4	9,0	0,0	0,0	448,1
1953	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	34,2	109,4	90,3	53,8	0,0	0,0	0,0	287,7
1954	0,0	14,9	0,0	17,6	0,0	38,3	163,7	73,2	101,7	1,1	12,4	0,0	422,9
1955	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	47,9	112,2	158,8	54,0	8,2	0,0	0,0	381,1
1956	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	10,3	88,1	108,0	192,6	10,1	0,3	0,0	411,3
1957	0,0	0,0	0,0	3,7	38,7	7,1	110,3	158,4	76,2	35,1	0,0	0,3	429,8
1958	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	60,4	93,6	324,6	125,6	0,0	16,1	0,0	620,3
1959	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	25,8	61,7	131,1	109,9	0,0	0,0	0,0	335,8
1960	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	30,0	58,2	48,1	1,5	0,0	0,0	142,8
1961	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48,2	79,6	174,6	18,0	0,0	0,0	0,0	320,4
1962	0,0	3,4	0,0	0,0	0,0	7,6	91,2	136,6	37,5	4,7	0,0	0,0	281,0
1963	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	26,1	96,8	138,6	17,5	40,0	0,0	0,0	319,2
1964	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	11,0	160,2	240,8	56,8	3,2	0,0	0,0	473,0
1965	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	16,3	107,2	141,1	98,0	1,0	0,0	0,0	363,7
1966	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	59,7	32,5	72,3	60,5	32,2	0,0	2,5	259,7
1967	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	58,0	34,7	218,0	157,2	32,5	2,7	0,0	503,9
1968	0,0	3,8	0,0	2,0	0,0	49,6	14,7	75,0	56,3	0,0	0,0	0,0	201,4
1969	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,3	194,6	198,1	59,2	68,1	0,0	0,0	534,3
1970	0,0	0,0	0,0	1,2	2,4	7,8	18,4	130,4	286,1	0,0	0,0	0,0	446,3
1971	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	10,3	22,9	85,8	35,3	4,8	3,1	0,0	163,7
1972	2,9	0,0	0,0	0,0	3,2	19,1	2,1	42,2	39,9	9,3	0,0	0,0	118,7
1973	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	62,0	12,4	82,9	18,8	0,0	0,0	0,0	176,1
1974	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	3,2	114,7	82,3	65,9	5,7	0,0	0,0	273,8
1975	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	9,9	87,3	129,2	36,0	4,5	0,0	0,0	268,0
1976	2,7	0,0	0,0	0,0	9,0	13,2	76,6	112,2	83,4	33,1	0,0	0,0	330,2
1977	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,3	71,5	52,1	1,3	0,0	0,0	170,2
1978	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,1	19,7	114,4	119,0	6,2	38,4	6,4	310,2
1979	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,3	36,7	31,8	63,6	1,8	0,0	0,0	155,2
1980	0,0	11,4	0,0	0,0	0,0	32,5	12,0	78,9	61,6	21,6	0,0	0,0	218,0
1981	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	65,5	104,1	139,5	0,0	0,0	0,0	310,7
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,0	8,6	66,6	14,1	0,0	0,0	0,0	100,3
1983	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	54,4	26,4	39,5	33,1	0,0	0,0	0,0	155,3
1984	0,0	0,0	0,0	0,0	7,6	27,9	68,1	38,0	54,1	49,0	0,0	0,0	244,7
1985	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	8,4	45,7	99,5	11,6	0,0	0,0	0,0	167,2
1986	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	20,5	64,4	140,7	0,0	0,0	0,0	227,3
1987	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8	14,6	76,9	67,5	5,2	0,0	0,0	172,0
1988	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,4	50,6	152,5	52,6	0,0	0,0	0,0	264,1
1989	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	55,5	78,1	200,1	36,0	5,2	0,0	0,0	374,9

Tableau A.3.4 - Précipitations décadaires à Rosso (1968-1989)

	Janvier			Février			Mars			Avril			Mai			Juin		
	1 ^è déc.	2 ^è déc.	3 ^è déc.	1 ^è déc.	2 ^è déc.	3 ^è déc.	1 ^è déc.	2 ^è déc.	3 ^è déc.	1 ^è déc.	2 ^è déc.	3 ^è déc.	1 ^è déc.	2 ^è déc.	3 ^è déc.	1 ^è déc.	2 ^è déc.	3 ^è déc.
1968	0,0	0,0	0,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	7,0
1969	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1970	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1971	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1972	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	0,0	0,0
1973	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
1974	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1975	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1976	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0
1977	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0
1978	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	12,0	4,0	0,0
1979	0,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,0	11,0	0,0
1980	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1981	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1983	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0
1984	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,6	0,0	0,0
1985	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1986	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1987	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	6,2
1988	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
1989	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	24,7

	Juillet			Août			Septembre			Octobre			Novembre			Décembre		
	1 ^{er} déc.	2 ^e déc.	3 ^e déc.	1 ^{er} déc.	2 ^e déc.	3 ^e déc.	1 ^{er} déc.	2 ^e déc.	3 ^e déc.	1 ^{er} déc.	2 ^e déc.	3 ^e déc.	1 ^{er} déc.	2 ^e déc.	3 ^e déc.	1 ^{er} déc.	2 ^e déc.	3 ^e déc.
1968	8,0	6,0	23,0	24,0	28,0	8,0	46,0	0,0	22,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1969	39,0	2,0	54,0	52,0	8,0	98,0	37,0	6,0	1,0	22,0	1,0	21,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1970	0,0	28,0	12,0	2,0	43,0	3,0	32,0	11,0	19,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1971	8,0	18,0	0,0	0,0	42,0	41,0	11,0	5,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1972	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	18,0	7,0	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1973	11,0	4,0	0,0	24,0	18,0	47,0	12,0	48,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1974	0,0	0,0	17,0	63,0	0,0	25,0	15,0	0,0	3,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1975	33,0	14,0	70,0	2,0	9,0	97,0	53,0	29,0	9,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0
1976	0,0	30,0	1,0	47,0	13,0	0,0	12,0	28,0	95,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,0	0,0
1977	0,0	0,0	0,0	0,0	37,0	0,0	41,0	45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1978	43,0	0,0	1,0	51,0	8,0	16,0	46,0	112,0	20,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1979	10,0	13,0	21,0	55,0	0,0	102,0	0,0	73,0	4,0	8,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1980	3,0	0,0	7,0	70,0	12,0	43,0	15,0	5,0	59,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1981	3,0	0,0	119,0	50,0	0,0	16,0	26,0	36,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1982	0,0	10,0	28,0	0,0	27,0	80,0	0,0	21,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1983	0,0	3,2	0,0	19,5	0,0	2,3	0,5	0,0	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1984	0,0	0,0	0,0	8,7	0,0	0,0	1,5	58,2	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1985	0,0	44,0	0,0	54,4	2,5	6,0	38,0	17,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1986	11,0	0,0	0,0	122,3	2,0	2,6	92,0	75,0	24,2	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0
1987	0,0	23,5	0,0	9,1	0,0	42,4	36,5	34,2	31,3	2,4	8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1988	0,0	8,6	10,1	31,0	33,7	59,2	20,5	88,9	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1989	2,5	48,1	0,6	2,0	86,7	62,8	16,3	1,1	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau A.3.5 - Précipitations décadaires à Kaédi (1968-1989)

	Janvier			Février			Mars			Avril			Mai			Juin		
	1 ^è déc.	2 ^è déc.	3 ^è déc.	1 ^è déc.	2 ^è déc.	3 ^è déc.	1 ^è déc.	2 ^è déc.	3 ^è déc.	1 ^è déc.	2 ^è déc.	3 ^è déc.	1 ^è déc.	2 ^è déc.	3 ^è déc.	1 ^è déc.	2 ^è déc.	
1968	0,0	0,0	0,0	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
1969	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1970	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	57,2	0,0
1971	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1972	0,0	0,0	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,4	0,0
1973	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0
1974	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1975	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1976	0,0	0,0	17,7	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0
1977	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,3	3,4
1978	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,0	10,9
1979	0,0	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,4
1980	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,3
1981	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1983	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,7
1984	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	42,8
1985	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1986	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1987	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	68,5
1988	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1989	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0

	Juillet			Août			Septembre			Octobre			Novembre			Décembre			
	3è déc.	1è déc.	2è déc.	3è déc.	1è déc.	2è déc.	3è déc.	1è déc.	2è déc.	3è déc.	1è déc.	2è déc.	3è déc.	1è déc.	2è déc.	3è déc.	1è déc.	2è déc.	3è déc.
1968	9,0	6,2	3,3	7,5	0,0	0,0	10,6	108,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1969	0,0	107,4	0,0	53,5	52,4	7,0	0,0	40,0	19,0	0,0	33,5	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1970	0,0	0,0	24,5	31,2	52,1	44,6	22,0	20,0	44,4	12,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1971	0,0	13,4	5,7	17,5	16,2	41,1	63,3	61,5	12,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1972	2,0	0,0	0,1	8,5	1,7	11,7	46,3	5,9	15,6	0,0	0,0	9,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1973	0,0	5,8	11,6	6,9	5,2	100,2	28,0	19,6	40,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1974	16,3	0,0	57,2	61,8	47,0	6,2	132,8	48,4	27,0	0,0	19,1	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1975	5,6	29,3	118,6	35,8	13,6	0,6	77,1	16,4	3,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1976	0,0	0,0	54,1	41,2	16,2	60,3	7,6	2,4	22,5	2,9	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0
1977	0,0	15,1	36,3	0,1	0,0	97,3	4,7	55,5	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1978	0,7	1,0	52,6	0,7	9,5	0,0	2,3	68,2	2,7	24,1	0,0	4,0	8,0	0,0	0,0	13,2	0,5	0,0	0,0
1979	0,0	21,0	4,9	21,8	31,7	0,0	49,0	16,2	22,8	0,0	7,0	5,6	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1980	0,0	74,2	0,0	5,4	88,4	53,3	31,1	8,5	3,7	3,8	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	0,0
1981	1,9	7,8	1,0	58,9	8,8	23,2	39,6	83,5	5,9	0,0	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1982	5,9	0,0	72,0	25,6	0,0	73,8	38,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1983	8,7	15,7	0,0	0,0	8,8	5,5	39,9	1,3	38,3	46,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1984	0,8	4,0	15,6	45,6	14,2	1,7	24,2	0,0	28,5	8,9	39,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1985	1,0	10,7	2,2	45,5	24,3	7,3	41,5	33,0	4,8	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,9	0,0
1986	0,8	26,6	0,0	6,5	8,4	18,2	9,4	43,6	58,0	55,4	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1987	0,0	2,9	27,3	3,9	8,1	0,0	63,5	83,5	13,9	3,3	6,1	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1988	0,0	0,0	0,6	32,3	0,0	34,9	83,9	53,2	14,3	82,4	0,0	2,5	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1989	0,0	9,6	58,1	25,5	8,0	79,3	76,1	24,0	0,0	17,7	14,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau A.3.6 - Précipitations décadaires à Kiffa (1968-1989)

	Janvier			Février			Mars			Avril			Mai			Juin		
	1 ^è déc.	2 ^a déc.	3 ^e déc.	1 ^è déc.	2 ^a déc.	3 ^e déc.	1 ^è déc.	2 ^a déc.	3 ^e déc.	1 ^è déc.	2 ^a déc.	3 ^e déc.	1 ^è déc.	2 ^a déc.	3 ^e déc.	1 ^è déc.	2 ^a déc.	
1968	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,5
1969	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,3
1970	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	6,0	0,0
1971	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9
1972	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	0,0	19,1	0,0	0,0
1973	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44,1	0,0	0,0
1974	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,2	0,0	0,0
1975	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	9,9
1976	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	0,0	2,0
1977	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1978	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3
1979	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	18,1	0,0
1980	0,0	0,0	0,0	7,0	0,0	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,5	0,0	0,0
1981	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1983	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	54,4
1984	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,6	0,0	0,0	27,5	0,0	0,0
1985	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1986	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1987	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	0,0
1988	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,4	0,0	0,0
1989	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2

	Juillet			Août			Septembre			Octobre			Novembre			Décembre				
	3è déc.	1è déc.	2è déc.	3è déc.	1è déc.	2è déc.	3è déc.	1è déc.	2è déc.	3è déc.	1è déc.	2è déc.	3è déc.	1è déc.	2è déc.	3è déc.	1è déc.	2è déc.	3è déc.	
1968	17,1	3,1	6,0	5,6	0,0	27,2	47,8	17,0	7,5	31,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1969	2,0	84,8	23,2	86,6	68,3	45,7	84,1	32,6	26,6	0,0	62,0	5,7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1970	1,8	0,3	4,5	13,6	54,6	61,7	14,1	9,3	48,1	228,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1971	5,4	1,8	13,5	7,6	7,5	23,0	55,3	24,4	1,3	9,6	0,0	4,8	0,0	0,0	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1972	0,0	0,0	2,1	0,0	4,3	16,3	21,6	0,0	39,9	0,0	0,0	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1973	17,9	0,0	2,1	10,3	40,6	38,2	4,1	4,7	14,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1974	3,0	29,1	53,5	32,1	37,6	6,2	38,5	28,3	29,8	7,8	0,7	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1975	0,0	0,0	54,5	32,8	11,3	2,5	115,4	21,4	14,6	0,0	0,0	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1976	11,2	0,0	53,0	23,6	0,7	111,5	0,0	0,5	3,4	79,5	32,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1977	0,0	7,0	10,1	28,2	0,0	70,9	0,6	29,4	22,2	0,5	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1978	2,8	4,0	2,6	13,1	57,8	36,4	20,2	28,8	54,4	35,8	0,0	2,7	3,5	0,0	0,0	38,4	6,4	0,0	0,0	0,0
1979	0,0	0,0	35,7	1,0	2,3	0,0	29,5	56,6	7,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1980	0,0	6,0	0,5	5,5	35,1	19,5	24,3	8,9	51,2	1,5	4,0	17,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1981	0,0	11,5	1,4	52,6	11,1	40,2	52,8	115,5	8,1	15,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1982	11,0	4,7	1,6	2,3	0,0	9,0	57,6	14,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1983	0,0	26,4	0,0	0,0	0,0	10,4	29,1	0,6	7,3	25,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1984	0,4	0,6	39,5	28,0	3,0	30,0	5,0	32,2	21,9	0,0	49,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1985	8,4	0,0	9,0	36,7	24,5	35,2	39,8	1,8	0,0	9,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1986	0,0	3,5	0,0	17,0	45,0	0,0	19,4	74,2	9,6	56,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1987	3,5	0,0	4,5	10,1	22,0	0,0	54,9	15,0	24,4	28,1	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1988	0,0	0,0	2,1	48,5	52,2	32,9	67,4	17,3	35,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1989	53,3	3,8	73,4	0,9	2,6	114,6	82,9	31,7	2,2	2,1	0,0	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

ANNEXE 4

Localisation des segments

figure A.4.1 - Répartition des segments sur la composition colorée de la zone pilote de Rosso

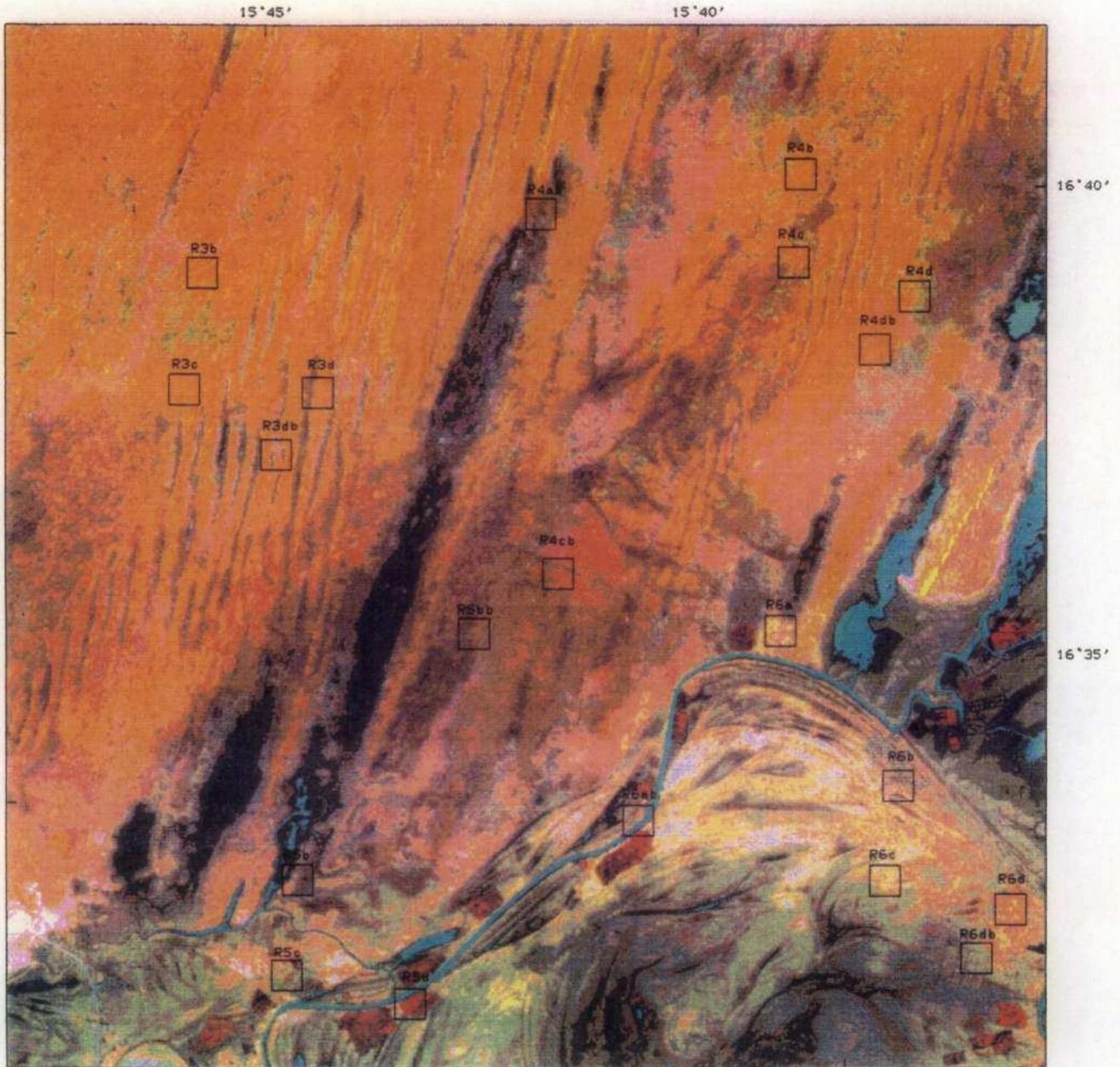
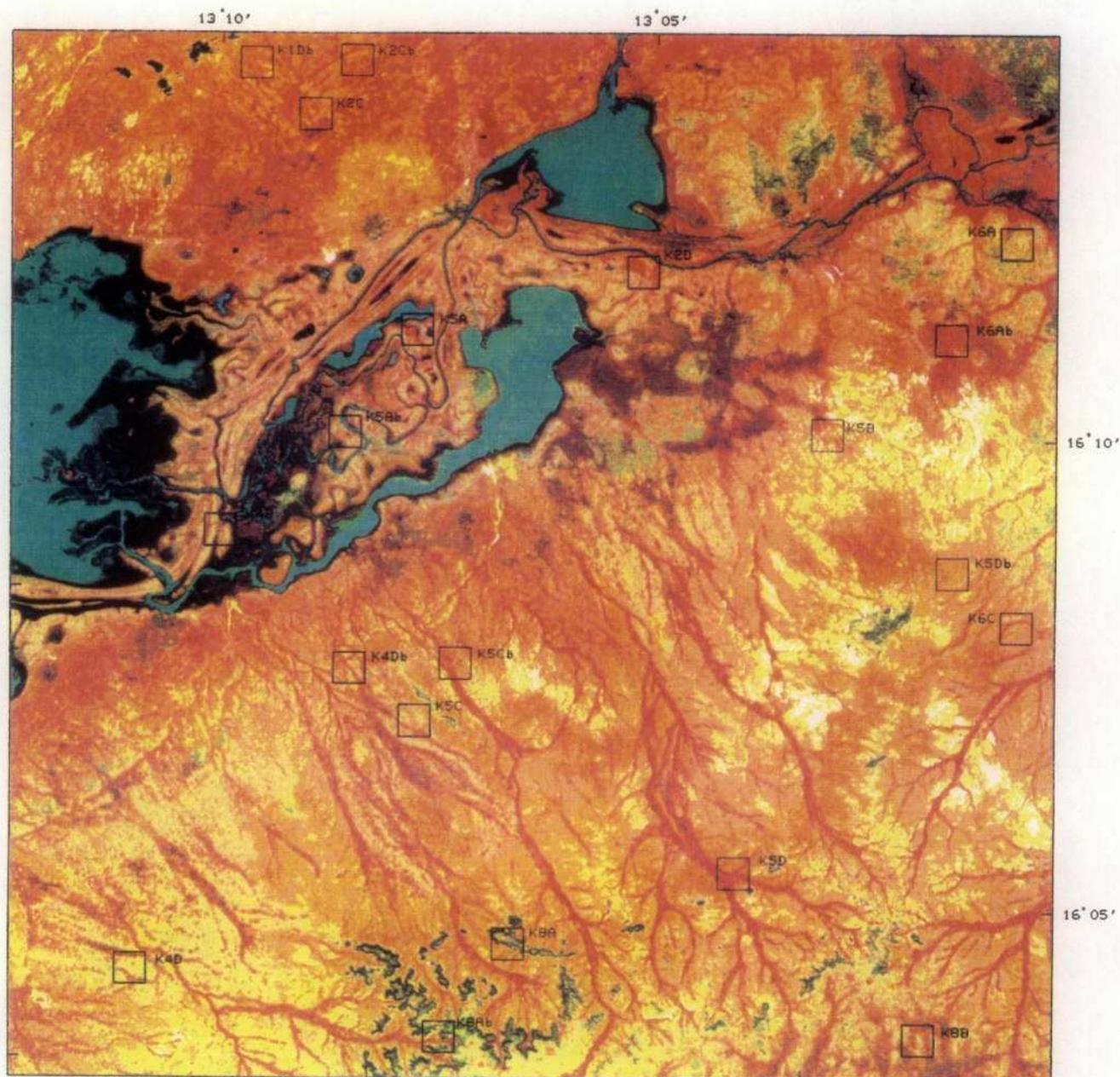


figure A.4.2 - Répartition des segments sur la composition colorée de la zone pilote de Lekseiba



ANNEXE 5

Variance & Stratification

tableau A.5.1 - Evolution de la variance inter et intra-classes (zone pilote de Rosso)

Nb de classes dans la partition	Variance intra		Variance inter		Variance intra		Variance inter		Différence entre deux partitions successives				
	première comp.	deuxième comp.	Var intra F1	Var inter F1	Var intra F2	Var inter F2							
20,00	10,58		41,33		10,11		39,27						
19,00	10,75		41,34		10,26		39,29		0,17	0,01	0,15	0,02	
18,00	10,93		41,35		11,08		39,11		0,18	0,01	0,82	-0,18	
17,00	11,16		41,36		11,54		39,04		0,23	0,01	0,46	-0,07	
16,00	11,90		41,22		11,71		39,06		0,74	-0,14	0,17	0,02	
15,00	11,96		41,29		11,97		39,06		0,06	0,07	0,26	0,00	
14,00	12,77		41,14		11,89		39,19		0,81	-0,15	-0,08	0,13	
13,00	13,16		41,13		12,94		38,94		0,39	-0,01	1,05	-0,25	
12,00	13,60		41,11		13,94		38,70		0,44	-0,02	1,00	-0,24	
11,00	14,30		41,02		12,83		39,28		0,70	-0,09	-1,11	0,58	
10,00	15,50		40,74		13,74		39,14		1,20	-0,28	0,91	-0,14	
9,00	16,37		40,62		15,43		38,67		0,87	-0,12	1,69	-0,47	
8,00	17,72		40,29		15,39		39,00		1,35	-0,33	-0,04	0,33	
7,00	18,14		40,49		16,99		38,62		0,42	0,20	1,60	-0,38	
6,00	20,86		39,48		18,2		38,51		2,72	-1,01	1,21	-0,11	
5,00	22,03		39,52		21,74		37,00		1,17	0,04	3,54	-1,51	
4,00	24,56		38,84		21,92		38,07		2,53	-0,68	0,18	1,07	
3,00	27,66		38,13		31,22		29,81		3,10	-0,71	9,30	-8,26	
2,00	39,25		19,69		30,82		35,14		11,59	-18,44	-0,40	5,33	
Variance totale													
41,64 (1e composante F1) et 39,59 (2e composante F2)													
Les résultats présentés sont en réalité des écarts types et non des variances.													
Nous ne les avons pas retouchés après obtension par la procédure SAS Candisc.													

figure A.5.1 - Composition des strates de la zone pilote de Rosso

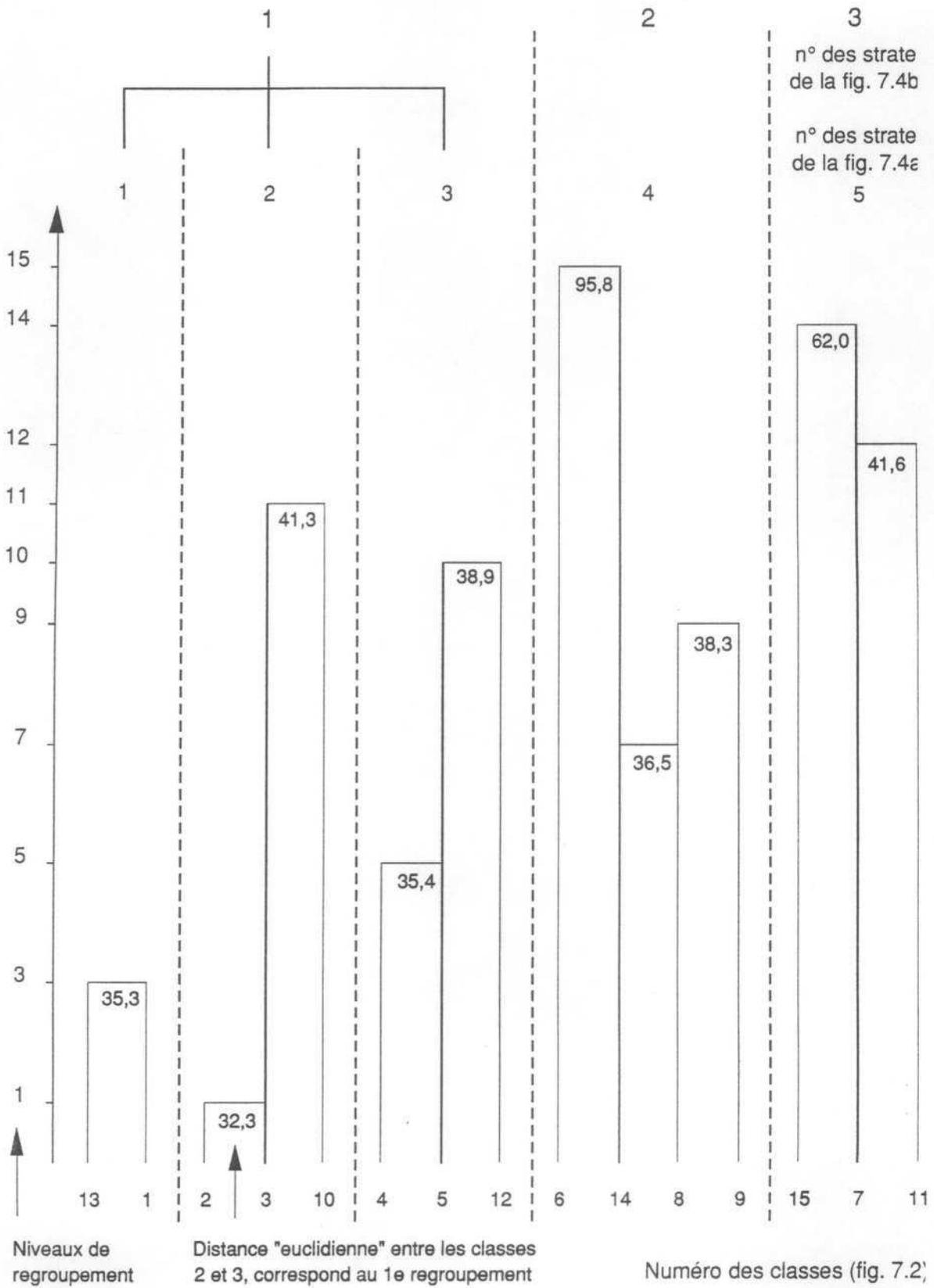


figure A.5.2 - Composition des strates de la zone pilote de Lekseiba

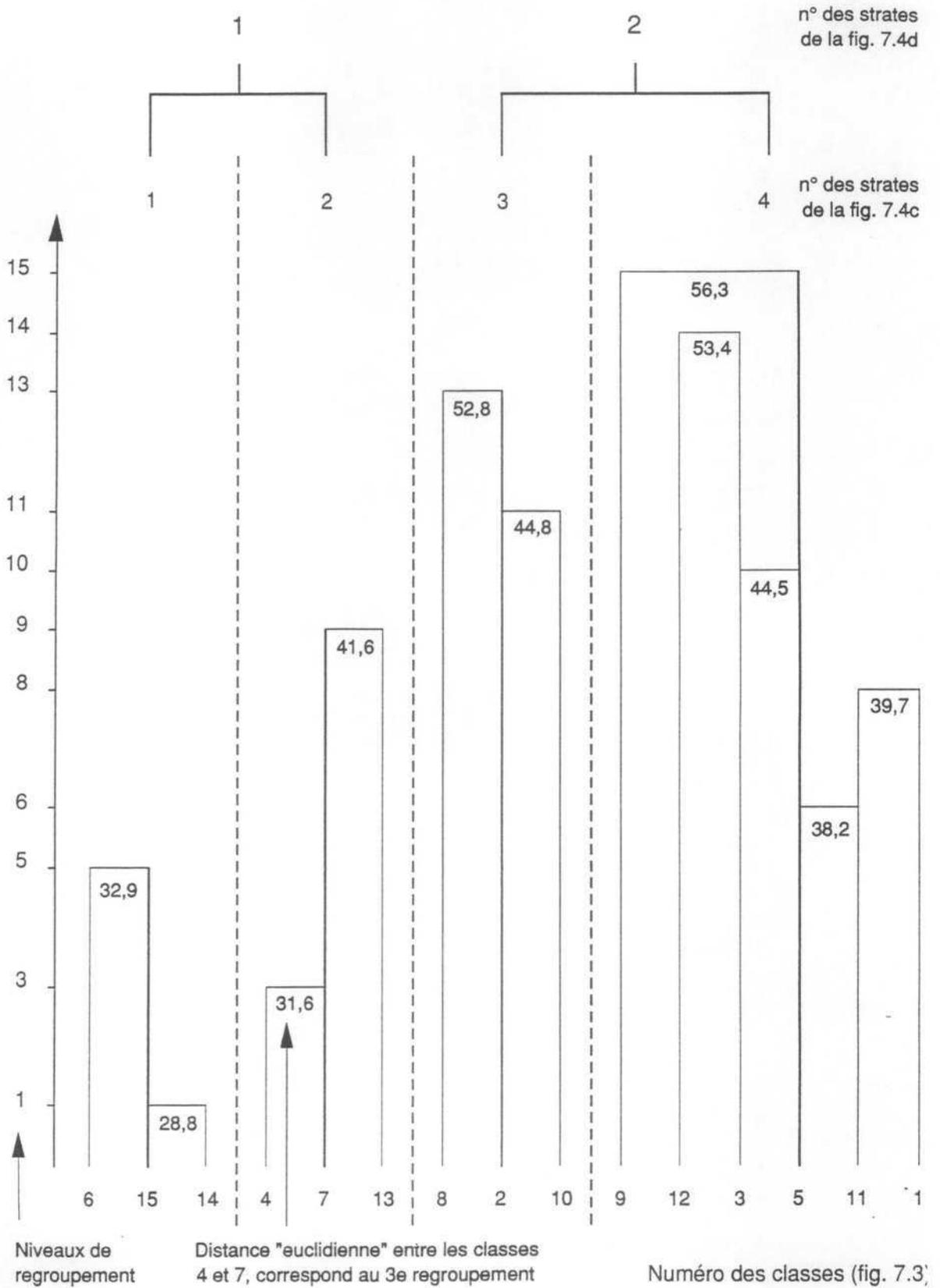
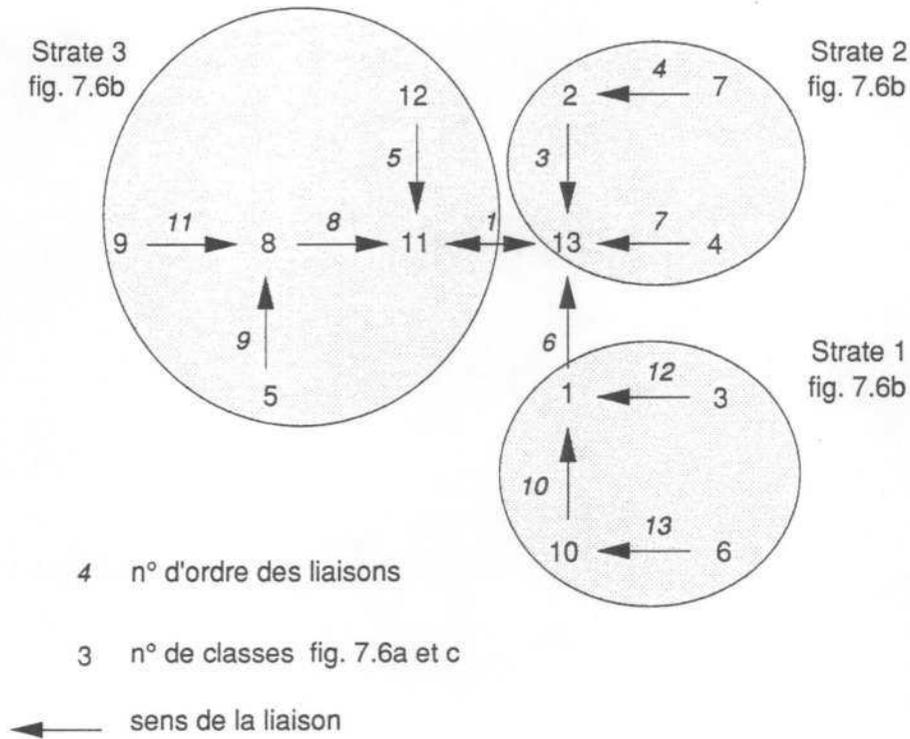
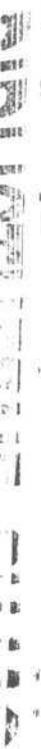


figure A.5.3 - Composition des strates de la zone pilote des oasis



En raison d'une configuration radiométrique relativement complexe pour la zone pilote des oasis, il n'a pas été possible de représenter les regroupements dans les strates de la même manière que pour Rosso et Lekseiba. De plus, en raison d'une date tardive de prise de vue, 30 décembre 1987, la constitution des strates s'appuie essentiellement sur l'organisation spatiale et respecte peu l'ordre des liaisons établi sur les distances euclidiennes (contrairement à Rosso et Lekseiba).



ANNEXE 6

Descriptif des unités d'occupation du sol

Ce descriptif des thèmes retenus est repris de l'Annexe II du rapport de fin de recherche¹. Certaines modifications ont été apportées pour qu'il s'insère dans la présente recherche.

Le crédit photographique est le suivant.

G. De Wispelaere fiches : Ci, Sah, Sna, Sb, Pa, Sa, Sad, et Af.

V. Godard : Se, Shy, Sns, Sva, Shd, Shi, Sae, Saf, Sh et Sn.

¹DE WISPELAERE 1989 : 145-181

Se

UNITE CARTOGRAPHIQUE : Surface en eau

Zone pilote :	ROSSO	LEKSEIBA
Superficie :	1,6%	5,4%



Le fleuve Sénégal à Kaédi - novembre 1987

Position : Lit mineur des cours d'eau, dépressions et talwegs inondés à la date de prise de vue

Texture du sol :

Végétation

- **Structure :**

Observations : Après la décrue, ces zones peuvent être soit cultivées, soit devenir des prairies pâturées.

UNITE CARTOGRAPHIQUE : Culture irriguée

Zone pilote : ROSSO LEKSEIBA

Superficie : 0,7%



Juxtaposition sorgho plus riz - novembre 1985

Position : Le long du fleuve Sénégal et de ses affluents

Texture du sol : Sol argileux du wallo

Végétation

- **Structure :** Riz et sorgho essentiellement

Observations : Ne sont représentées que les cultures irriguées dont l'activité végétale et le recouvrement sont suffisants (lors de la prise de vue).

UNITE CARTOGRAPHIQUE : Steppe
herbeuse très claire des dépres-
sions hydromorphes

ZONE PILOTE : ROSSO LEKSEIBA
SUPERFICIE : 12,7%



Cuvette de Tin Yeddar - mars 1988

Position : Cuvettes et dépressions interdunaires hydromorphes

Texture du sol : Argileuse à argilo-sableuse

Végétation

- Structure : Strate arbustive presque inexistante (inférieure à 1 p.100) - strate herbacée très claire ; zone très rapidement exploitée

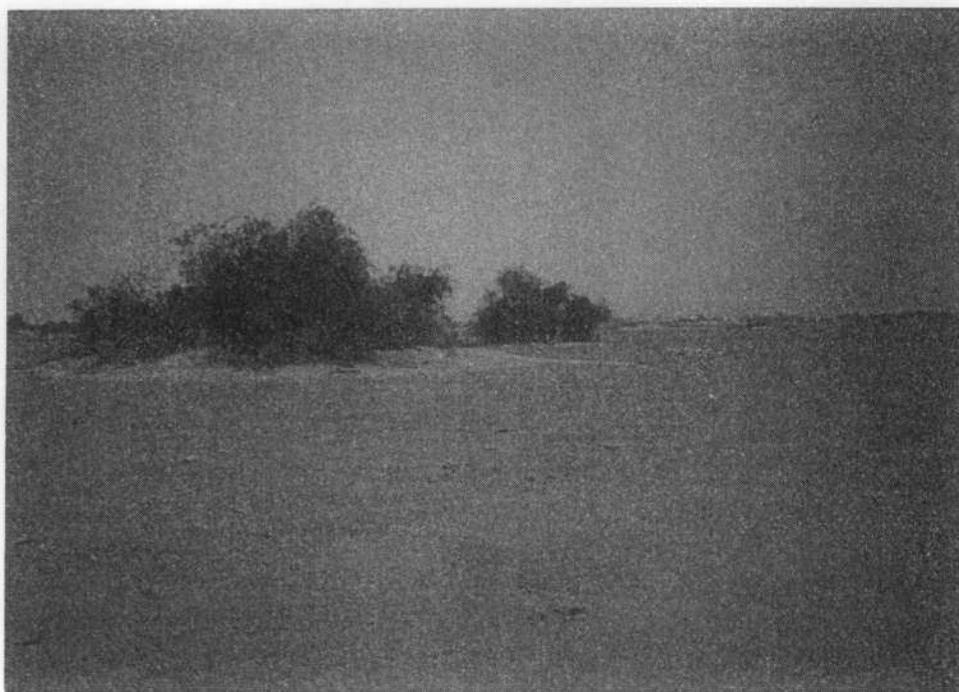
Observations : Zone très fréquentée par les troupeaux.

Sns

UNITE CARTOGRAPHIQUE : Sol nu sablo-argileux

Zone pilote : ROSSO LEKSEIBA

Superficie : 24,8%



Piégeage sableux à Salvadora spp. - mars 1988

Position : Lit majeur du fleuve, partie exondée du wallo et cuvettes interdunaires

Texture du sol : Argileuse dominante, localement sablo-argileuse sur le wallo ; argilo-sableuse pour les cuvettes interdunaires

Végétation

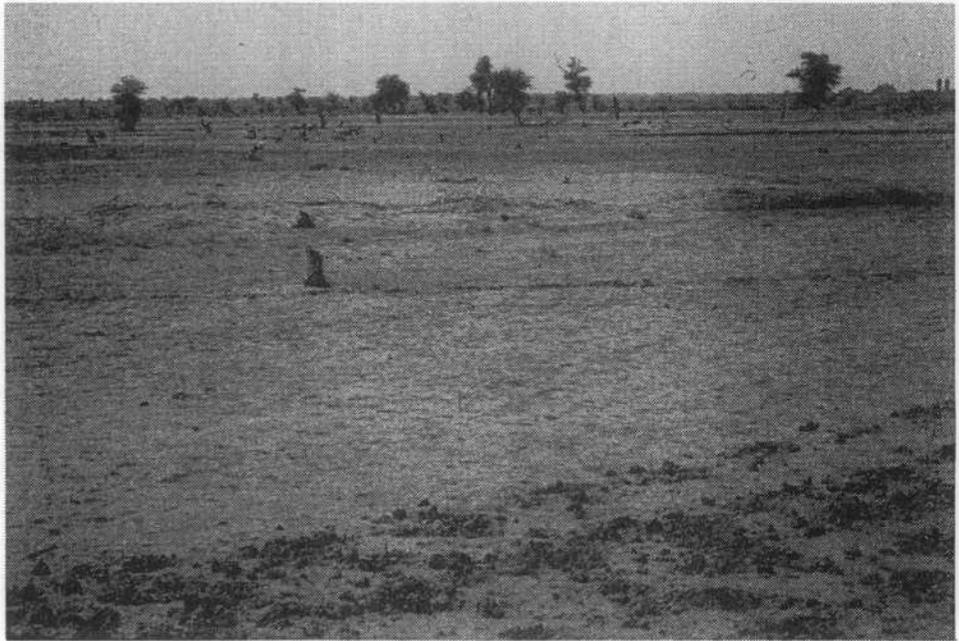
- **Structure** : Contractée sur les micro-dunes, strate herbacée pratiquement inexistante

Observations : Secteur d'extension actuel des cultures irriguées à proximité du fleuve Sénégal ou de ses affluents.

UNITE CARTOGRAPHIQUE : Sol nu argileux

Zone pilote : ROSSO LEKSEIBA

Superficie : 4,1%



Secteur dégradé du wallo - octobre 1987

Position : Lit majeur du fleuve et fond de cuvette, zone indurée

Texture du sol : Argileuse avec une surface pelliculaire très claire

Végétation

- Structure : Sans

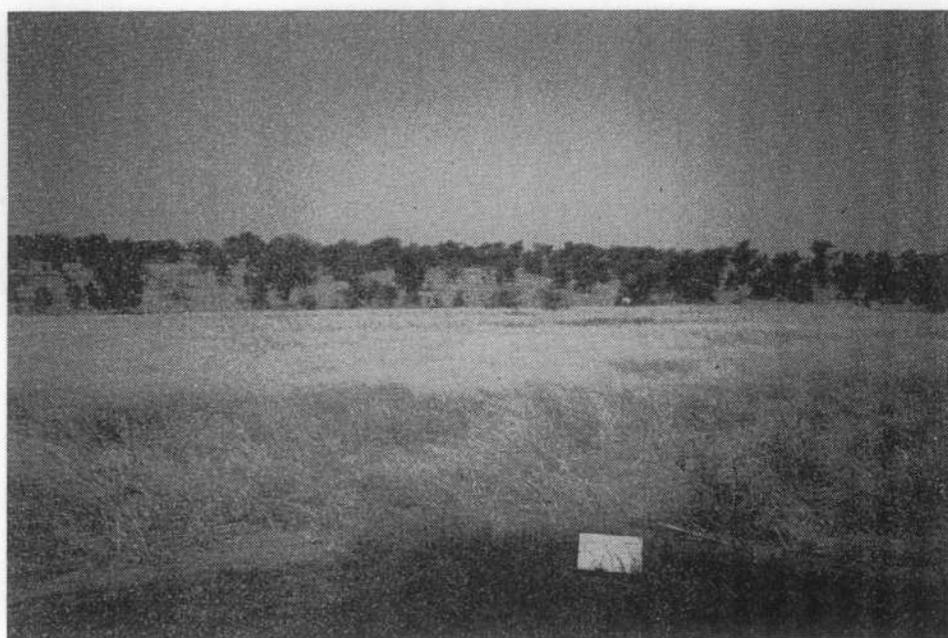
Observations : Zone très dégradée et très réfléchante où ne subsistent plus que quelques souches.

Shi

UNITE CARTOGRAPHIQUE : Steppe herbeuse des
ensablements et interdunes

Zone pilote : ROSSO LEKSEIBA

Superficie : 19,1%



Bas de pente d'ondulation sableuse - novembre 1987

Position : Bas de pente et interdunes bien drainés ainsi que les grandes dépressions sableuses

Texture du sol : Sableuse à sablo-limoneuse

Végétation

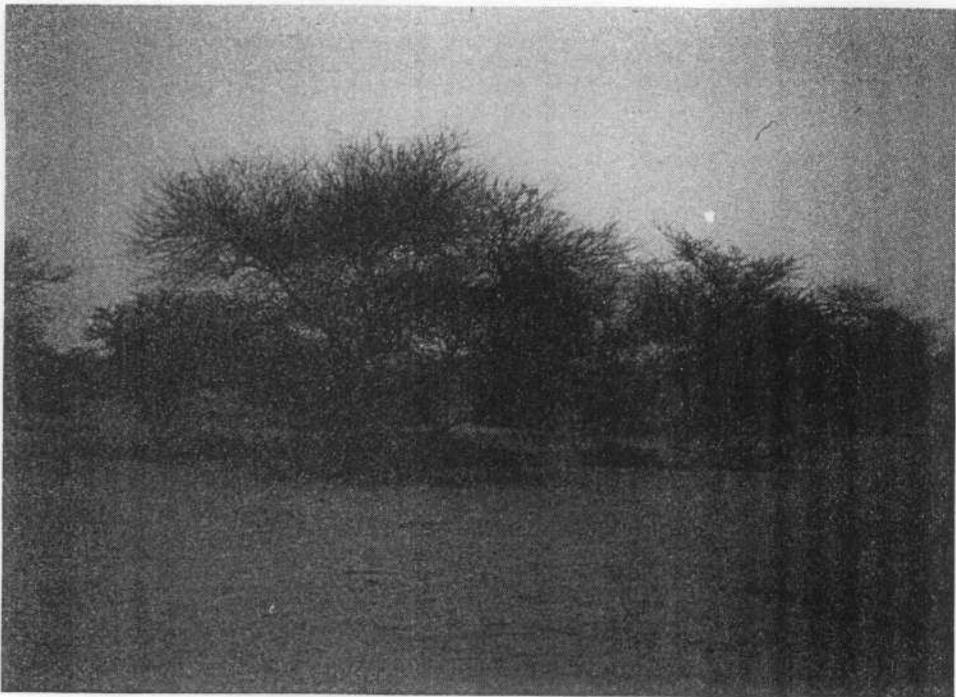
- **Structure :** Strate ligneuse lâche (recouvrement inférieur à 3 p.100) dominée par Acacia senegal, Balanites aegyptiaca, A. tortilis. La strate herbacée est moyennement dense

Observations : Thème de transition entre la "Steppe herbeuse très claire" et la "Steppe arbustive des ensablements".

UNITE CARTOGRAPHIQUE : Steppe arbustive des
ensablements

Zone pilote : ROSSO LEKSEIBA

Superficie : 2,7%



Peuplement lâche de gommiers - avril 1988

Position : Pénéplaines et fonds d'interdunes

Texture du sol : Sableuse à sablo-limoneuse

Végétation

- Structure : Strate arbustive assez dense (5 à 15 p.100 de recouvrement) à Acacia senegal, dominant "gommeraie clairsemée". Strate herbacée moyennement dense

Observations : La mortalité des gommiers peut être importante dans certains secteurs en raison de la sécheresse et/ou d'un émondage excessif.

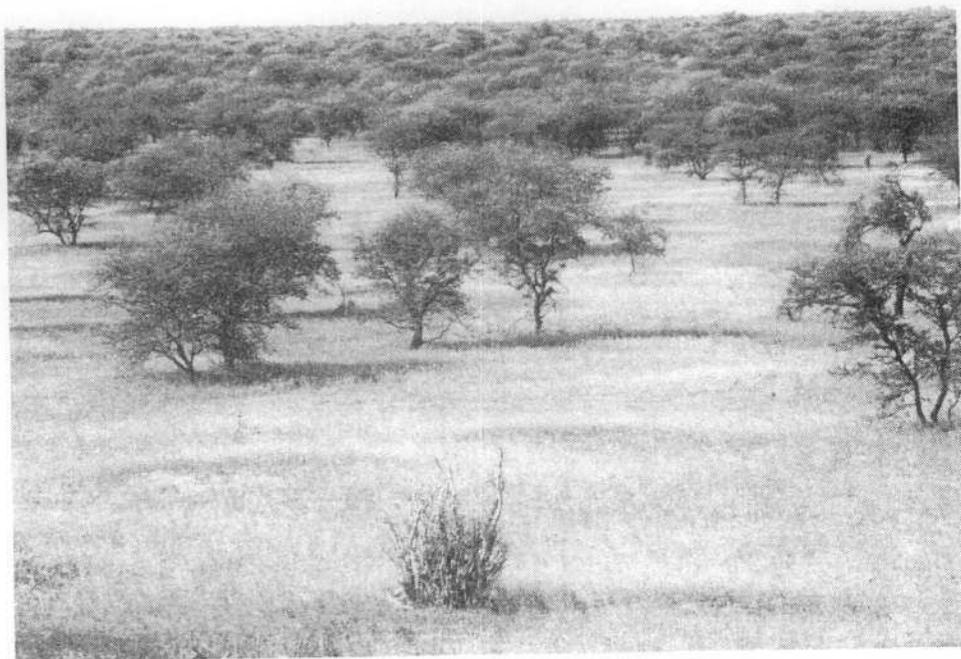
Sb

UNITE CARTOGRAPHIQUE : Steppe "boisée" gommeraie

Zone pilote : ROSSO

LEKSEIBA

Superficie : 0,6%



Peuplement dense de gommiers - octobre 1987

Position : Pénéplaines sableuses et interdunes

Texture du sol : Sablo-limoneuse

Végétation

- Structure : Steppe arbustive dense, recouvrement supérieur à 15 p.100 (mesuré jusqu'à 75 p.100). A. senegal dominant "gommeraie". Strate herbacée hétérogène claire en sous-bois dense, plus fournie dans les clairières.

Observations : Zone de pâturage très fréquentée pour l'ombrage et la biomasse ligneuse

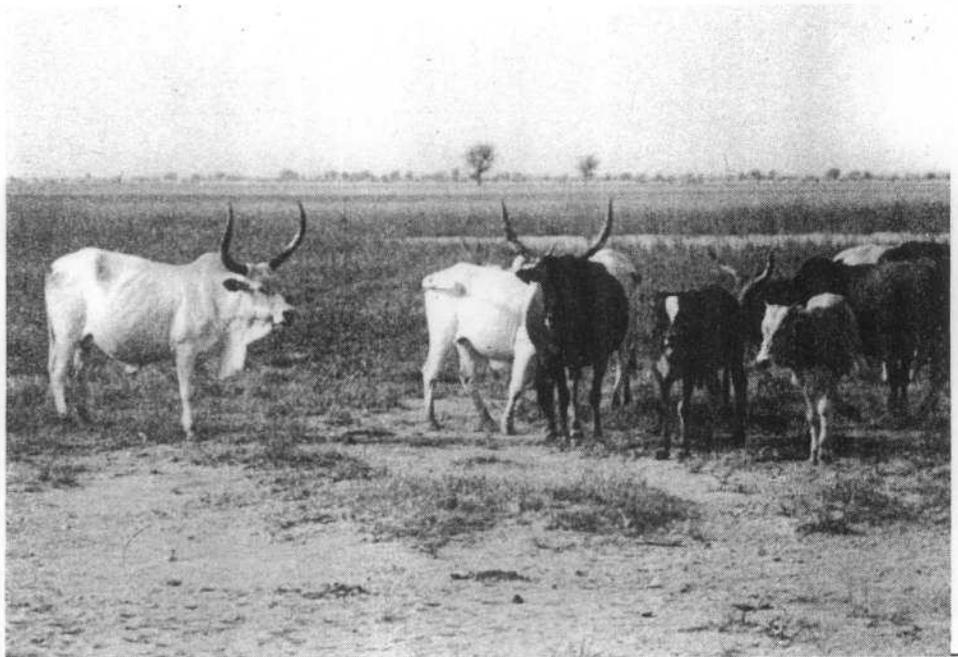
UNITE CARTOGRAPHIQUE : Prairie aquatique

Zone pilote : ROSSO

LEKSEIBA

Superficie :

5,2%



Pâturage de décrue Gorgol - octobre 1987

Position : Dépression à hydromorphie marquée

Texture du sol : Argileuse

Végétation

- Structure : Strate arbustive absente. Strate herbacée composée d'hydrophytes (Echinochloa sp.)

Observations : La décrue du Gorgol laisse place à une prairie aquatique, zone de concentration de nombreux troupeaux.

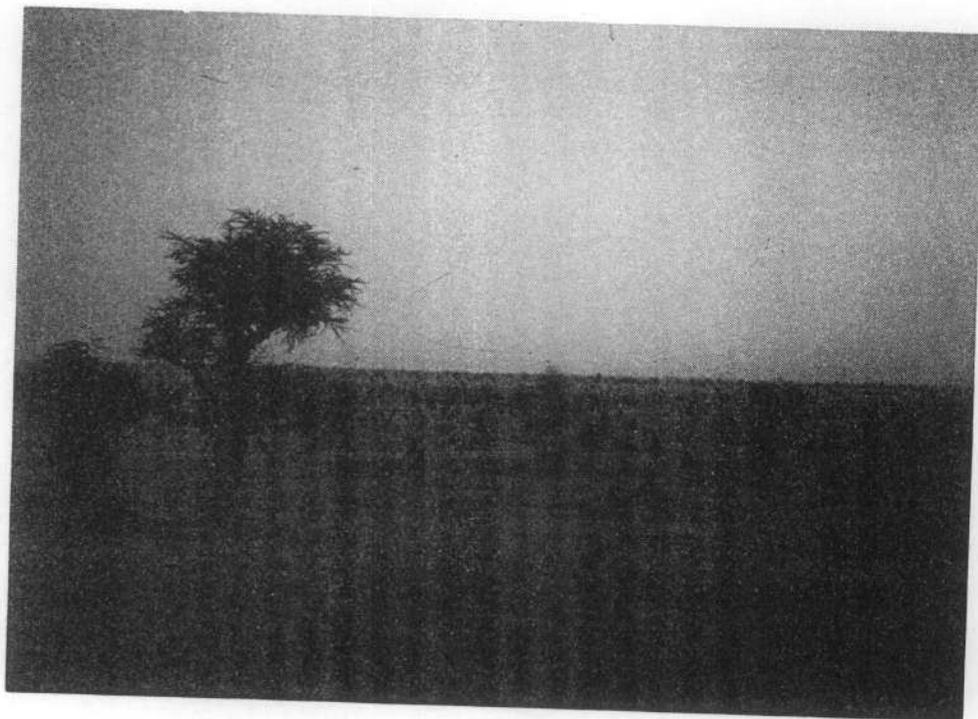
UNITE CARTOGRAPHIQUE : Steppe arbustive

Zone pilote : ROSSO

LEKSEIBA

Superficie :

20,1%



Balanites rabattu par le bétail - octobre 1987

Position : Bas de pentes des ensablements et ondulations sablonneuses bien drainées

Texture du sol : Sableuse à sablo-limoneuse

Végétation

- **Structure** : Strate arbustive variable (3 à 20 p.100 de recouvrement). Strate herbacée claire à moyennement dense

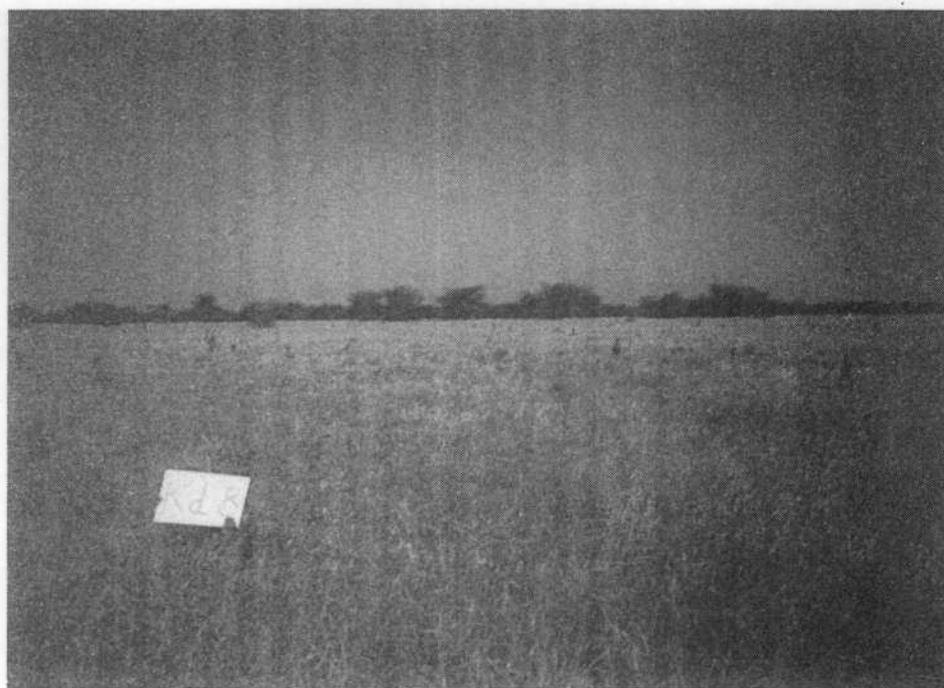
Observations : Cette steppe se maintient ou se développe essentiellement en bordure du Gorgol au pied des glaciers de raccordement des affleurements du Continental Terminal.

Sh

UNITE CARTOGRAPHIQUE : Steppe herbeuse

Zone pilote : ROSSO LEKSEIBA

Superficie : 21,8%



"Ex steppe arbustive" en bordure du Gorgol -
novembre 1987

Position : Ondulations sablonneuses et levées alluviales

Texture du sol : Sablo-limoneuse grisâtre

Végétation

- Structure : Strate arbustive absente (anthropisme),
strate herbacée relativement homogène et dense

Observations : Cette formation peut être le résultat d'une
dégradation anthropique (cas de la photographie) ou de la
sécheresse.

Sad

UNITE CARTOGRAPHIQUE : Steppe arbustive dense dégradée

Zone pilote : ROSSO

LEKSEIBA

Superficie :

27,7%



Pterocarpus lucens au sud du Gorgol - novembre 1985

Position : Glacis sablo-gravillonnaires

Texture du sol : Limono-sableuse avec localement des plages de gravillons ferrugineux

Végétation

- **Structure** : Steppe arbustive discontinue, localement dense mais avec beaucoup d'arbres morts (Pterocarpus lucens essentiellement). Strate herbacée très discontinue, regroupée sur les piègeages sableux

Observations : Formation la plus importante se situant principalement sur le glacis de raccordement entre les plateaux du Continental Terminal et la vallée du Gorgol.

Sn

UNITE CARTOGRAPHIQUE : Sol nu

Zone pilote : ROSSO LEKSEIBA

Superficie : 9,2%



Epandage gravillonnaire - octobre 1987

Position : Glacis pierreux et bourrelet de berge du Gorgol

Texture du sol : Limono-sableuse avec de fréquentes plages graveleuses

Végétation

- **Structure :** Strate arbustive très lâche à inexistante.
Strate herbacée pratiquement absente

Observations : Formation pratiquement stérile ne portant de la végétation herbacée que sur quelques "placages" sableux.

UNITE CARTOGRAPHIQUE : Affleurement rocheux

Zone pilote : ROSSO LEKSEIBA

Superficie : 1,5%



Collines de grès cuirassées - octobre 1987

Position : Versant des plateaux cuirassés (éboulis)

Texture du sol : Composée de blocs, gravillons et d'éléments sablo-limoneux

Végétation

- Structure : Strate arbustive non négligeable suivant les sites. Dominée par Pterocarpus lucens. Strate herbacée clairsemée entre les blocs et graviers

Observations : Ces buttes sont fréquemment couvertes d'une strate arbustive assez dense principalement dans la partie Sud du Gorgol.

ANNEXE 7

Détail des résultats statistiques

Nous présentons ici un exemple de calcul d'estimation de superficie pour le thème Surface en eau (Se) de la zone pilote de Rosso. Sauf mention contraire, ces calculs font référence aux résultats publiés dans cette Annexe (cf. tab. A.7.2.) et utilisent les formules exposées au chapitre 9.

- Résultats sans l'apport de la télédétection

le formulaire et les résultats sont présentés à la section 9.2.

- Estimation de la superficie du thème k

Rappel :

$$S_k = S_{zp} * \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m P_{ki}$$

et

$$P_{ki} = \frac{n_{ki}}{N_i}$$

où :

P_{ki} proportion d'occupation du sol du thème k dans le segment z_i ;

n_{ki} nombre de pixels du thème k tirés dans le segment z_i ;

N_i nombre total de pixels tirés dans le segment z_i ;

m nombre de segments inventoriés (20 par zone pilote) ;

S_{zp} superficie de la zone pilote (1 022 * 1 022 dans le cas de Rosso, 1 024 * 1 024 pour Lekseiba) ;

S_k superficie du thème k sur la zone pilote.

En réalité, comme nous avons initialisé les classifications avant d'effectuer les estimations de superficies, nous avons converties les proportions (P_{ki}) en nombre de pixels (y_{ki}) par la formule suivantes :

$$y_{ki} = P_{ki} * S_i$$

S_i nombre de pixels par segment (29 * 29 à Rosso et 30 * 30 à Lekseiba).

cette conversion permet le calcul de la fourchette d'acceptabilité des classifications (cf. 7.3.2.3.). Plutôt que de reprendre les proportions (P_{ki}), nous avons effectué les estimations de superficies à partir du nombre de pixels par segment (y_{ki}), nombre de pixels par segment lu dans le tableau A.7.1. Notons que cela ne change rien aux résultats. La formule opérationnelle devient donc :

$$S_k = S_{zp} * \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m \frac{y_{ki}}{S_i}$$

Pour le thème des Surfaces en eau, le développé des calculs est le suivant :

$$S_k = (1\ 022 * 1\ 022) * \frac{1}{20} * \frac{178 + 130 + 5}{29 * 29} = 19\ 436,59$$

Ce résultat est dans le tableau A.7.2 (colonne.B, ligne.3).

- *Variance de l'estimation de la superficie S_k :*

$$\text{Var}(S_k) = S_{zp}^2 * \frac{1}{m} * \frac{1}{m-1} * \frac{M-m}{M} * \sum_{i=1}^m (P_{ki} - \bar{P}_k)^2$$

En raison de l'utilisation de y_{ki} à la place de P_{ki} , la formule opérationnelle devient :

$$\text{Var}(S_k) = S_{zp}^2 * \frac{1}{m} * \frac{1}{m-1} * \frac{M-m}{M} * \sum_{i=1}^m \left(\frac{y_{ki} - \bar{y}_k}{S_i} \right)^2$$

avec :

\bar{y}_k moyenne de la catégorie k, sur le terrain, au niveau des segments [cf. tab. A.7.2 (col.G ligne 3)] ;

M nombre total de segments couvrant la zone pilote ;

c'est-à-dire :

$$M = \frac{S_{zp}}{S_i} = \frac{1\ 022 * 1\ 022}{29 * 29} = 1\ 241,95$$

et

$$\frac{M-m}{M} = \frac{1\ 241,95 - 20}{1\ 241,95} = 0,98$$

Ce rapport est proche de 1 pour des taux de sondage peu élevés comme ici, où ce taux est proche de 1,7 p.100.

enfin,

$$\sum_{i=1}^{20} \left(\frac{y_{ki} - \bar{y}_k}{S_i} \right)^2 = \left(\frac{178 - 15,6}{841} \right)^2 + \left(\frac{130 - 15,6}{841} \right)^2 + \left(\frac{5 - 15,6}{841} \right)^2 + 17 \left(\frac{0 - 15,6}{841} \right)^2 = 0,06$$

La variance de l'estimation $\text{Var}(S_k)$ est de :

$$\text{Var}(S_k) = (1\,022 * 1\,022)^2 * \frac{1}{20} * \frac{1}{19} * 0,98 * 0,06 = 174\,568\,267,3$$

L'écart-type (s), racine carrée de la variance, est de [cf. tab. A.7.2 (col.C ligne 3)] :

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}(S_k)} = 13\,212,43 \text{ pixels}$$

Soit un coefficient de variation (CV) de [cf. tab. A.7.2 (col.D ligne 3)] :

$$\text{CV} = \frac{\sigma}{S_k} * 100 = \frac{13\,212,43}{19\,436,59} * 100 = 68,3 \text{ p.100}$$

- Résultats avec l'apport de la télédétection :

Pour effectuer la régression linéaire, on part du principe que la carte explique le terrain donc que x la variable explicative est lue sur la classification et y la variable expliquée sur les données de terrain.

le formulaire et les résultats sont présentés à la section 9.1.

- Estimateur de superficie $y_{\text{reg } k}$ au niveau du segment :

$$y_{\text{reg } k} = \bar{y}_k + a \left(\frac{X_k}{M} - \bar{x}_k \right)$$

avec :

\bar{y}_k moyenne de la catégorie k , sur le terrain, au niveau des segments [cf. tab. A.7.2 (col.G ligne 3)] ;

a pente de la droite de régression estimée comme suit ;

$$a = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ki} - \bar{x}_k)(y_{ki} - \bar{y}_k)}{\sum_{i=1}^m (x_{ki} - \bar{x}_k)^2}$$

- \bar{x}_k valeur du thème k pour l'ensemble de la zone pilote sur la classification ;
- m nombre de segments dans l'échantillon ;
- M nombre total de segments compris dans la zone pilote ;
- x_{ki} nombre de pixels comptés sur la classification (cf. tab. A.7.1) pour le segment z_i ;
- \bar{x}_k moyenne de la catégorie k, sur la classification, au niveau des segments ;
- y_{ki} nombre de pixels comptés sur le relevé de terrain (cf. tab. A.7.1) pour le segment z_i .

La pente de la droite est de [cf. tab. A.7.2 (col. H, ligne 3)] :

$$a = \frac{(197 - 15,6) * (178 - 15,6) + (115 - 15,6) * (130 - 15,6) + (0 - 15,6) * (5 - 15,6) + 17 * (0 - 15,6)^2}{(197 - 15,6)^2 + (115 - 15,6)^2 + 18 * (0 - 15,6)^2}$$

$$a = 0,96$$

L'estimation de superficie au niveau du segment est de [cf. tab. A.7.3 (col. J, ligne 3)] :

$$y_{reg\ k} = 15,6 + 0,96 * \left(\frac{16\ 738}{1\ 241,95} - 15,6 \right) = 13,6 \text{ pixels}$$

- *Estimation de superficie $Y_{reg\ k}$ au niveau de la zone pilote :*

$$Y_{reg\ k} = M * y_{reg\ k}$$

$$Y_{reg\ k} = 1\ 241,95 * 13,6 = 16\ 913,73 \text{ pixels}$$

[cf. tab. A.7.2 (col. L, ligne 3)]

- Variance de l'estimateur $y_{reg k}$ au niveau du segment :

$$\text{Var}(y_{reg k}) = \frac{(M - m)}{M} * \frac{1}{m} * \frac{1}{m - 2} * \sum_{i=1}^m e_{ki}^2$$

où
$$e_{ki}^2 = [y_{ki} - \bar{y}_k - a(x_{ki} - \bar{x}_k)]^2$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{20} e_{ki}^2 &= [178 - 15,6 - 0,96(197 - 15,6)]^2 + [130 - 15,6 - 0,96(115 - 15,6)]^2 \\ &\quad + [5 - 15,6 - 0,96(0 - 15,6)]^2 + 17 * [0 - 15,6 - 0,96(0 - 15,6)]^2 \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^{20} e_{ki}^2 = 498,97$$

La variance de l'estimateur $\text{Var}(y_{reg k})$ au niveau du segment est de :

$$\text{Var}(y_{reg k}) = 0,98 * \frac{1}{20} * \frac{1}{18} * 498,97 = 1,43$$

L'écart-type associé σ , racine carrée de la variance de cette estimation au niveau du segment, est de [cf. tab. A.7.2 (col. K, ligne 3)] :

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}(y_{reg k})} = 1,2 \text{ pixel}$$

- Variance de l'estimateur $Y_{reg k}$ au niveau de la zone pilote :

$$\text{Var}(Y_{reg k}) = M^2 * \text{Var}(y_{reg k})$$

$$\text{Var}(Y_{reg k}) = 1\ 241,9^2 * 1,43 = 2\ 205\ 688,92$$

L'écart-type σ , racine carrée de la variance de cette estimation au niveau de la zone pilote, est de [cf. tab. A.7.2 (col. M, ligne 3)] :

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}(Y_{reg k})} = 1\ 485,23 \text{ pixels}$$

Le coefficient de variation (CV) est alors de [cf. tab. A.7.2 (col. N, ligne 3)] :

$$CV = \frac{\sigma}{Y_{\text{reg } k}} * 100 = \frac{1\ 485,23}{16\ 913,73} * 100 = 8,78 \text{ p.100}$$

tableau A.7.1 - Effectifs en pixels des différents thèmes comptabilisés par segment sur le terrain et la classification (zone pilote de Rosso)

Données collectées sur le terrain																				
y (terrain)	R6Db	R6D	R6C	R6B	R6Ab	R6A	R4Cb	R4Db	R4D	R4C	R4B	R4Ab	R5D	R5C	R5B	R5Bb	R3Db	R3D	R3C	R3B
Se	0	0	0	0	178	0	0	0	0	0	0	0	130	0	5	0	0	0	0	0
Ci	0	0	0	0	42	0	0	0	0	0	0	0	418	0	0	0	0	0	0	0
Sah	1	4	0	60	42	9	0	0	0	0	0	0	14	13	24	0	0	0	0	0
Shy	73	3	0	185	114	27	0	0	0	0	0	0	57	106	569	0	3	1	0	0
Sns	759	719	336	445	399	427	0	163	24	4	3	216	218	715	243	29	230	59	0	13
Sna	8	115	505	151	66	361	0	0	0	0	0	0	4	7	0	0	0	0	0	7
Sv	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	1	15	135
Shd	0	0	0	0	0	3	277	618	339	414	710	29	0	0	0	0	442	478	821	626
Shi	0	0	0	0	0	0	518	60	478	423	128	445	0	0	0	522	136	290	5	60
Sae	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	139	0	0	0	198	0	12	0	0
Sb	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	12	0	0	0	92	0	0	0	0
Somme /seg	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841
Données collectées sur la classification																				
x (classif.)	R6Db	R6D	R6C	R6B	R6Ab	R6A	R4Cb	R4Db	R4D	R4C	R4B	R4Ab	R5D	R5C	R5B	R5Bb	R3Db	R3D	R3C	R3B
Se	0	0	0	0	197	0	0	0	0	0	0	0	115	0	0	0	0	0	0	0
Ci	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	405	0	0	0	0	0	0	0
Sah	0	2	0	11	24	0	0	0	0	0	0	20	28	16	28	0	0	0	0	0
Shy	116	7	1	139	130	57	0	0	0	0	0	431	79	147	572	0	21	18	0	0
Sns	725	824	369	579	358	431	4	203	55	11	14	168	209	667	225	9	215	80	3	8
Sna	0	8	471	112	71	343	0	0	0	0	0	0	3	9	15	0	0	0	0	0
Sv	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	21	1	25	188
Shd	0	0	0	0	1	3	190	511	167	321	631	13	2	2	0	0	427	426	783	536
Shi	0	0	0	0	0	7	487	125	619	509	196	209	0	0	1	147	157	316	30	109
Sae	0	0	0	0	0	0	153	1	0	0	0	0	0	0	0	494	0	0	0	0
Sb	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	191	0	0	0	0
Somme/seg	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841	841

tableau A.7.2 - Résultats aux différentes étapes des calculs d'estimation des superficies (zone pilote de Rosso)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	ROSSO	Superficie	Ecart type	Coef. de	Superf.					Sup. est	E. type	Superficie	Ecart type	Coef. de
2	Thèmes	estimée Sk	de Sk	var.(%)	Xk	\bar{x}_k	\bar{y}_k	a	r	y reg k	y reg k	estim. Y reg k	de Y reg k	var.(%)
3	Se	19 437	13 212	68,3	16 738	15,6	15,6	0,96	0,99	13,6	1,2	16 914	1 485	8,8
4	Ci	28 565	25 741	90,1	8 532	23,2	23,0	1,03	0,99	6,2	1,0	7 664	1 255	16,4
5	Sah	10 370	13 521	130,4	17 537	6,4	8,3	0,89	0,58	15,2	3,0	18 886	3 750	19,9
6	Shy	70 667	36 126	51,1	199 798	85,9	56,9	0,67	0,78	107,0	18,7	132 841	23 185	17,5
7	Sns	310 613	70 472	22,7	266 202	257,9	250,1	0,95	0,98	208,6	10,2	259 065	12 619	4,9
8	Sna	76 008	36 615	49,5	32 423	51,6	61,2	1,06	0,98	34,3	5,7	42 585	7 123	16,7
9	Sv	12 109	8 395	69,3	19 473	11,8	9,7	0,72	0,99	12,6	1,0	15 560	1 291	8,3
10	Shd	295 399	80 143	27,1	230 665	200,7	237,9	1,11	0,99	221,3	9,6	274 889	11 960	4,4
11	Shi	190 330	56 621	29,7	190 264	145,6	153,3	0,90	0,84	160,1	25,1	198 799	31 068	15,6
12	Sae	23 783	14 479	60,9	53 136	32,4	19,1	0,37	0,80	23,0	7,3	28 525	9 004	31,5
13	Sb	7 203	5 707	79,2	9 716	9,9	5,8	0,48	0,99	4,8	0,7	5 972	910	15,2
14	tous les résultats sont en pixels sauf mention contraire													
15														
16	colonne B,C et D : estimation sans l'apport de la télédétection (résultats en ha tab. 9.5, descriptif des formules au § 9.2.1.)													
17	colonne E : Xk est la superficie par thème mesurée sur la classification (résultats en ha tab. 9.11)													
18	colonne F à I : paramètre de la régression sur les segments où \bar{x}_k est la moyenne sur la classification des pixels par thèmes et par segment,													
19	\bar{y}_k celle des pixels de terrain, a la pente de la droite de régression et r le coef. de corrélation													
20	colonne J et K : résultats de l'estimateur par la régression au niveau des segments (descriptif des formules § 9.1.1.)													
21	colonne L,M et N : résultats de l'estimateur par la régression au niveau de la zone pilote (résultats en ha tab. 9.3)													

tableau A.7.3 - Effectifs en pixels des différents thèmes comptabilisés par segment sur le terrain et la classification (zone pilote de Lekseiba)

Données collectées sur le terrain																				
y (terrain)	K1Db	K2Cb	K2C	K6A	K6Ab	K5B	K5Db	K6C	K8B	K5D	K8A	K8Ab	K4D	K5C	K5Cb	K4Db	K4B	K5Ab	K5A	K2D
Se	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	87	98	0
Pa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	155	87	140	16
Sah	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127	13	14	0
Saf	0	0	13	0	401	65	0	0	42	274	0	70	0	0	32	0	0	0	0	0
Sa	212	422	512	14	483	113	0	80	380	176	16	85	175	32	209	257	141	176	127	434
Sh	650	478	163	745	16	225	183	97	239	321	321	127	125	161	225	274	127	300	338	145
Sad	38	0	212	113	0	176	633	402	211	129	225	239	388	546	370	289	140	150	127	273
Sn	0	0	0	0	0	321	84	321	28	0	16	56	212	161	64	80	168	87	56	32
Af	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	322	323	0	0	0	0	0	0	0	0
Somme /seg	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
Données collectées sur la classification																				
x (classif.)	K1Db	K2Cb	K2C	K6A	K6Ab	K5B	K5Db	K6C	K8B	K5D	K8A	K8Ab	K4D	K5C	K5Cb	K4Db	K4B	K5Ab	K5A	K2D
Se	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44	66	128	12
Pa	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	157	101	135	143
Sah	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	91	27	40	28
Saf	0	7	66	0	512	4	0	3	54	311	0	66	77	2	53	36	0	0	0	0
Sa	252	521	357	81	308	73	5	80	354	242	83	121	111	70	167	219	164	205	158	264
Sh	553	362	316	425	56	189	154	124	297	269	230	103	117	229	261	263	180	300	255	231
Sad	2	0	137	56	23	301	721	565	76	74	75	134	261	266	388	184	71	109	104	148
Sn	93	10	24	307	1	267	20	127	119	3	179	121	334	333	31	198	193	92	80	74
Af	0	0	0	31	0	0	0	1	0	1	333	355	0	0	0	0	0	0	0	0
Somme/seg	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900

tableau A.7.4 - Résultats aux différentes étapes des calculs d'estimation des superficies (zone pilote de Lekseiba)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	LEKSEIBA	Superficie	Ecart type	Coef. de	Superf.					Sup. est	E. type	Superficie	Ecart type	Coef. de
2	Thèmes	estimée S_k	de S_k	var.(%)	X_k	\bar{x}_k	\bar{y}_k	a	r	y reg k	y reg k	estim. Y reg k	de Y reg k	var.(%)
3	Se	13 224	8 050	60,9	64 024	12,5	11,4	0,88	0,96	48,6	1,8	56 661	2 087	3,7
4	Pa	23 185	12 470	53,8	76 996	28,8	19,9	0,73	0,85	47,2	5,8	54 984	6 727	12,2
5	Sah	8 971	7 395	82,4	29 448	10,6	7,7	1,10	0,88	23,9	2,9	27 832	3 533	12,2
6	Saf	52 254	35 933	68,8	41 096	59,6	44,9	0,80	0,97	25,5	5,5	29 711	6 404	21,6
7	Sa	235 580	42 250	18,0	201 397	191,8	202,2	1,13	0,88	180,9	17,8	210 782	20 767	9,9
8	Sh	306 417	47 066	15,4	229 115	249,3	263,0	1,37	0,87	195,8	23,4	228 139	23 643	10,4
9	Sad	271 523	43 795	16,1	240 847	184,8	233,1	0,75	0,84	249,6	20,6	290 742	24 028	8,3
10	Sn	98 217	26 494	27,0	149 290	130,3	84,3	0,48	0,52	83,3	19,8	97 016	23 116	23,8
11	Af	39 205	26 434	67,4	16 363	36,1	33,7	0,94	0,99	13,0	0,1	15 187	852	5,6
12	tous les résultats sont en pixels sauf mention contraire													
13														
14	colonne B,C et D :	estimation sans l'apport de la télédétection (résultats en ha tab. 9.6, descriptif des formules au § 9.2.1.)												
15	colonne E :	X_k est la superficie par thème mesurée sur la classification (résultats en ha tab. 9.12)												
16	colonne F à I :	paramètre de la régression sur les segments où \bar{x}_k est la moyenne sur la carte des pixels par thèmes et par segments,												
17		\bar{y}_k celle des pixels de terrain, a la pente de la droite de régression et r le coef. de corrélation												
18	colonne J et K :	résultats de l'estimateur par la régression au niveau des segments (descriptif des formules § 9.1.1.)												
19	colonne L,M et N :	résultats de l'estimateur par la régression au niveau de la zone pilote (résultats en ha tab. 9.4)												

BIBLIOTHEQUE CIVILE

ANNEXE 8

Implantation des sites de suivi

Les sites de suivi portés sur les figures A.8.1 et A.8.2 font références aux enquêtes phytosociologiques qui ont eu lieu sur les zones d'étude d'octobre à décembre 1987. Les données phytosociologiques ont été traitées par des Analyses Factorielles des Correspondances (AFC). Cette méthode mise au point par A. Lacoste et M. Roux¹ permet d'identifier les unités de végétation sur la base d'affinités floristiques en présence absence (cf. 5.2.2.). La typologie, l'analyse des cartes factorielles ainsi que les tableaux floristiques sont détaillés dans le rapport de fin de recherche².

Il n'a pas été possible de reprendre à l'intérieur des zones pilotes, lors de l'inventaire de mars 1988, tous les sites de suivi. De toute façon, ceux-ci avaient été implantés par choix raisonné. Il était difficile de les associer pleinement à la méthode d'enquête par tirage aléatoire expérimentée ici.

On notera que l'inventaire programmé pour la fin de la saison des pluies 1989, inventaire qui n'a pas eu lieu en raison des événements d'avril 1989, devait associer à l'échantillonnage par segment une enquête phytosociologique pour réaliser l'intégration des deux modes de collecte et aboutir sur une cartographie des productions dont le mode de collecte aurait été probabiliste, avec les avantages que l'on sait.

¹LACOSTE 1971

²DE WISPELAERE 1989 : 13-28

figure A.8.1 - Les sites de suivi (zone pastorale de Rosso)

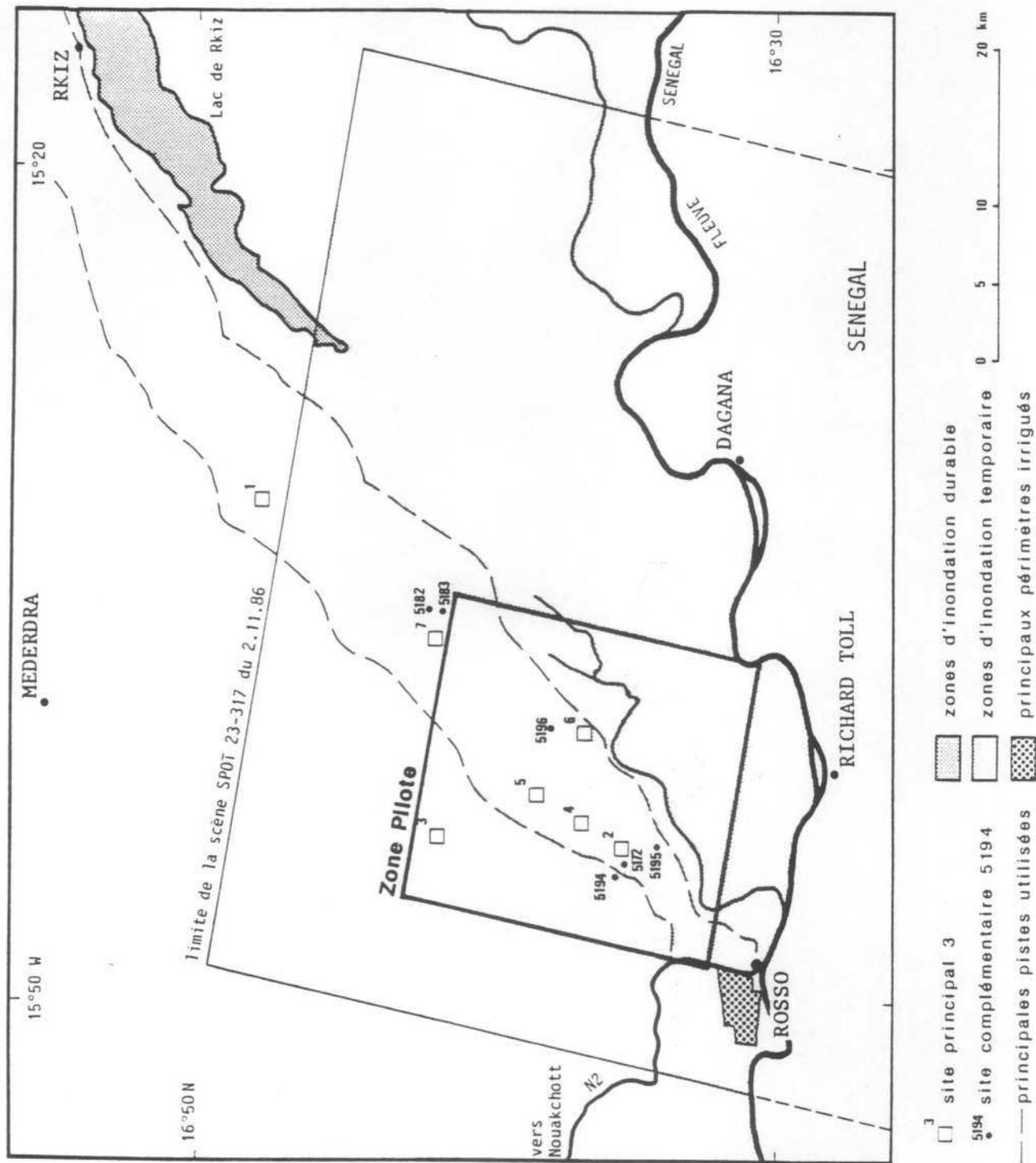
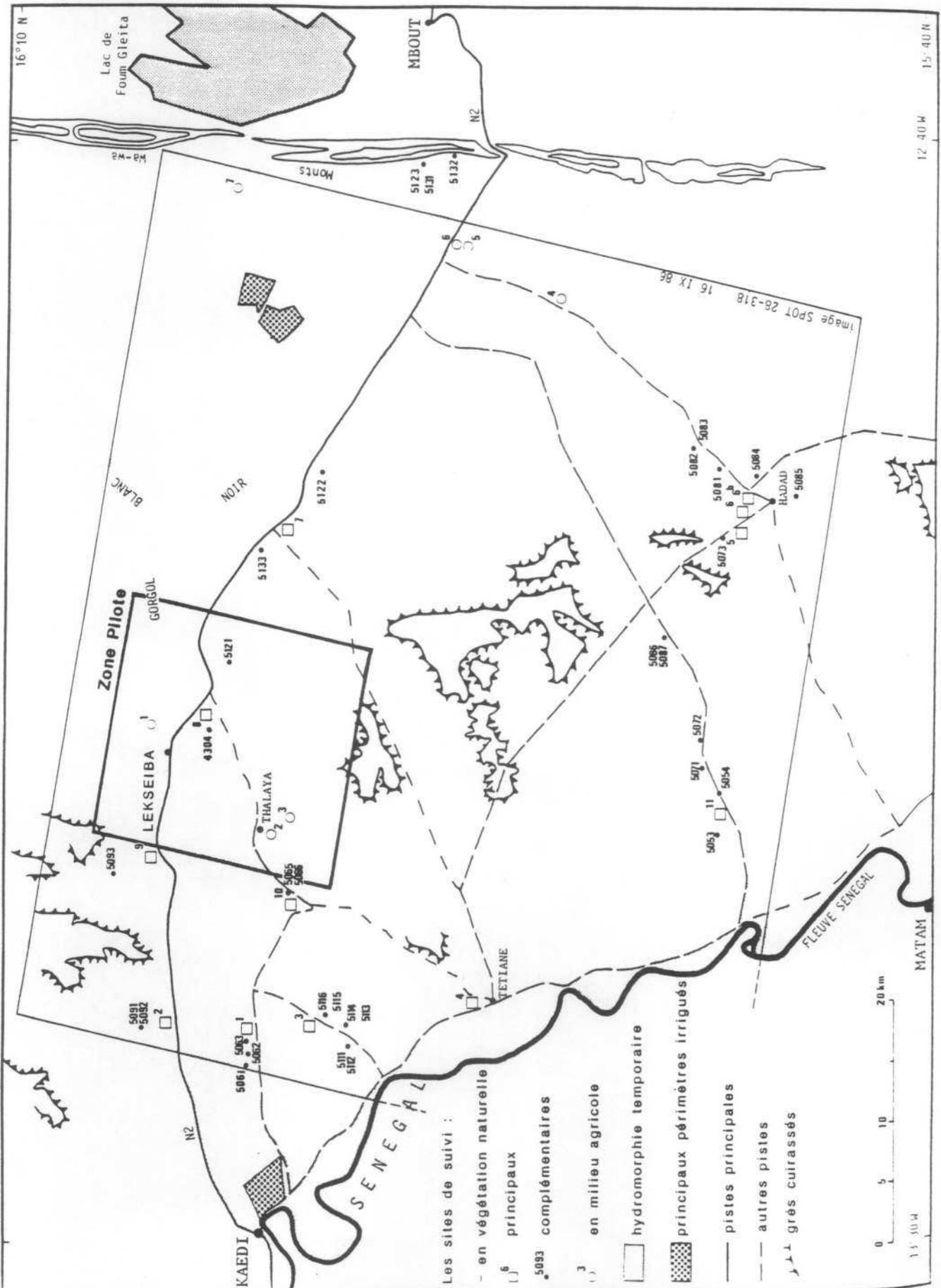


figure A.8.2 - Les sites de suivi (zone agropastorale de Lekseiba)



RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELLI (Ch.), RINALDI (M.) - 1986 - *Enquête TER-UTI Documentation*. Paris, SCEES, 53p.
- AMAN (A.) - sd - *Les méthodes de traitements d'image*. Toulouse, GDTA, photocopié du SITEL 21, 12 p.
- ANDRIANASOLO (H.) - 1987 - *Analyse statistique des données de télédétection Statistiques agricoles. Application sur Madagascar*. Paris, thèse de 3e cycle de l'EHESS, 2 tomes, 538 p.
- ANDRIANASOLO (H.) - 1988 - Modélisation statistique de la stratification d'un espace régional pour l'estimation de la superficie d'un thème au sol. *Deuxième séminaire informatique de l'ORSTOM*. Paris, ORSTOM : 145-174.
- ANDRIANASOLO (H.) - 1990 - Réduire l'incertitude sur une région rurale : une approche relevant de l'estimation de surfaces, à travers une modélisation reposant principalement sur les données satellitaires, sous contraintes d'opérationnalité. *AGROPOLIS ; GIS "Système énergétique et utilisation de l'espace". Atelier "Recherche Opérationnelle et développement"*, Montpellier 16-19 janvier 1990. multigr., 27 p.
- ARONNOF (S.) - 1982 - Classification accuracy : a user approach. *PE&RS*. Vol.48, n°8, aug. 1982 : 1299-1307.
- ASSELIN (L.M.) - 1984 - *Techniques de sondage avec application à l'Afrique*. Collection Coopération internationale et développement. Chicoutimi, Qué., Canada, gaëtan morin ed. 697 p.
- AUDRAIN (V.) - 1989 - *Méthodologie d'actualisation de documents cartographiques thématiques par télédétection aérienne et satellitaire*. Paris, Univ. de Paris I, thèse de doctorat, 164 p., 1 vol. d'annexe 136 p. + 2 cartes.
- BADUEL (P.R.) - 1991 - Mauritanie : l'importance des régions littorales et fluviales. in : *L'Etat du Maghreb*. Paris, La découverte : 167-168.
- BAGNOULS (M.) - 1962 - *Carte bioclimatique de la région méditerranéenne*. Paris, UNESCO-FAO, 2 feuilles.
- BARBARY (O.) - 1988 - *Sondages aréolaires pour l'estimation des données démographiques en milieu urbain. Essai de définition d'une méthode de collecte intégrant l'information satellitaire, application aux villes des pays en développement*. Paris, EHESS, Thèse de Doctorat, Vol.I : 1-382, Vol.II : 383-641.
- BARRIN (J. de) - 1991 - Mauritanie : des militaires en tenue de démocrates. *Le Monde*. 12-13 mai 1991.
- BAUDET (M.B.) - 1991 - Le GPS 100 a fait fureur pendant la guerre du Golfe. *Le Monde*. 6 mars 1991.
- BDPA - 1986 - *Statistiques agricoles par télédétection*. Phase I. Paris, Ministère de la coopération, 174 p., 1 vol. d'annexe, 4 cartes.
- BDPA - 1988 - *Prise de vue aérienne basse altitude échantillonnée sur l'arrondissement de Mayahi*. Principes et exploitations. Projet SOSPART III. Paris, BDPA, 22 p.
- BELEM (C.), BERGER (M.), KILIAN (J.), LAINE (G.), MORAND (P.) - 1988 - *Recherches sur l'insertion des systèmes de culture de la zone cotonnière de l'ouest du Burkina Faso à partir des données SPOT*. Montpellier, INERA-IRAT-IRCT, 18 p.
- BENSE (Cl.) - 1959 - La série stratigraphique de la région de Kiffa (Mauritanie orientale). *Bull. Soc. Géol. Fr.* 7e série, T. 1, n°2 : 128-131.
- BERNUS (E.) - 1984 - Les causes de la désertification : les thèses en présence. in : *La sécheresse au Sahel*. *Bul. Soc. Languedocienne de Géographie*. T. 18, Fasc. 3-4, juil. déc. 1984 : 159-164.

- BERRY (B.J.L.), BAKER (A.M.) - 1968 - Geographic sampling. in : *Berry (B.J.L.) & Marble (A.M.) ed. Spatial Analysis*, New Jersey, Englewood Cliffs, Prentice-Hall : 91-100.
- BERTIN (J.) - 1973 - *Sémiologie graphique*. Paris, Gauthier-Villars, 2e ed., 431 p.
- BERTRAND (G.) - 1968 - Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*. Tome 39, Fasc. 3 : 249-272.
- BESSIS (S.) - 1991 - Le conflit sénégal-mauritanien. in : *L'Etat du Maghreb*. Paris, La découverte, p.516.
- BIED-CHARRETON (M.), BALASINSKI (M.), BALLUT (A.) & alii - 1977 - Télédétection et aménagement. in : *Etat de l'art en télédétection (2e partie - 1er chapitre)*. Paris, OPIT, n° 77/463, 214 p. (rapport préliminaire).
- BOISSARD (P.), POINTEL (J.G.) - 1988 - Utilisation des données multitudes SPOT pour l'estimation de la productivité du blé en région Ile de France (Beauce). *SPOT-1 Utilisation des images, Bilan, Résultats. Paris 23-27 novembre 1987*. Toulouse, Cépadués ed. : 1-11 (TàP).
- BONIN (S.) - 1983 - *Initiation à la graphique*. Paris, EPI, 2e ed., 172 p.
- BONTE (P.) - 1986 - *Projet de développement de l'élevage en Mauritanie. Identification des associations pastorales*. Direction de l'élevage RIM-Banque Mondiale. 178 p.
- BONTE (P.) - 1990 - Le Sahel mauritanien. in : *Elevage et potentialités pastorales sahéliennes. Synthèses cartographiques. Mauritanie*. Maisons-Alfort, IEMVT/CTA : 14-20.
- BOUDET (G.) - 1981 - *Système de production d'élevage au Sénégal. Etude du couvert herbacé (2e campagne)*. Maisons-Alfort, IEMVT, 22 p. + annexes.
- BOUDET (G.) - 1984 - *Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères*. Collection Manuels et précis d'élevage. n°4. Paris, ed. du Ministère des relations extérieures de la coopération et du développement, 4e ed., 266 p.
- BOUDET (G.), CARRIERE (M.), CHRISTY (Ph.), WEDDOUD (ould CHEIKH A.) & al. - 1987a - Pâturage et élevage au sud de la Mauritanie (Kaédi) : Étude intégrée sur les pâturages, leur conservation et leur restauration; le cheptel et les éleveurs. Maisons-Alfort, IEMVT, 282 p.
- BOUDET (G.) - 1987b - Connaissance et gestion de l'espace pastoral sahélien. in : *Terroir pastoraux et agropastoraux en zone tropicale*. Maisons-Alfort, IEMVT : 1-59, Etudes et Synthèses n°24.
- BOUDET (G.) - 1990 - *Appui au bureau de pastoralisme du projet de développement de l'élevage en Mauritanie "Elevage II"*. Maisons-Alfort, IEMVT, 97 p.
- BRAUD (M.) - 1985 - Illustrations de l'importance des relations entre la variabilité de la pluviosité et les décisions des agriculteurs dans la gestion des systèmes de production. Résistance à la sécheresse en milieu intertropical : quelles recherches pour le moyen terme. Dakar Ngor, 24-27 septembre 1984. *Cahier de la Recherche Développement*. n°6, avril 1985 : 55-60.
- BRION (Ph.), BERTIN (M.), LABAT (Ph.) - 1982 - *Sondages*. Paris, SCEES, Série S, 40 p. (Méthodes et Applications Scientifiques n°5).
- BRION (Ph.), LABAT (Ph.) - 1984 - *Sondages : applications aux enquêtes agricoles*. Paris, SCEES, Série S, 77 p. (Méthodes et Applications Scientifiques n°10).

- BRUNEAU (M.), KILLIAN (J.), PAIRINTRA (C.), SAVARY (G.) - 1984 - *Approche des milieux agricoles du Tung Kula Ronghai (Thaïlande) à partir des données satellitaires (Landsat)*. Paris, min. Rel. Extérieures, 22 p.
- BRYANT (C.R.), RUSSWURM (L.H.) - 1983 - *Les méthodes d'échantillonnage aréolaire selon les besoins et objectifs de la surveillance de l'utilisation des terres*. Environnement Canada, Direction Général des terres, 76 p. (doc. de travail n°24).
- CAMPBELL (J.B.) - 1981 - Spatial Correlation Effects upon Accuracy of Supervised Classification of Land Cover. *PH&RS*. Vol. 47, n°3 : 355-363.
- CARRIERE (M.) - 1989 - *Les communautés végétales sahéliennes en Mauritanie (région de Kaédi); analyse de la reconstitution annuelle du couvert herbacé*. Maisons-Alfort, IEMVT, 238 p.
- CARRIERE (M.) - 1990 - Pâturages mauritaniens. in : *Elevage et potentialités pastorales sahéliennes. Synthèses cartographiques. Mauritanie*. Maisons-Alfort, IEMVT/CTA : 3-4.
- CASSANET (J.) - 1984 - *Satellites et capteurs*. Caen, Paradigme, 128 p. (Col. Télédétection satellitaire n°1).
- CESAR (J.) - 1990 - *Etude de la production biologique des savannes de Côte-d'Ivoire et de son utilisation par l'homme. Biomasse, valeur pastorale et production fourragère*. Maisons-Alfort, IEMVT, thèse publiée, 642 p.
- CHADULE (Groupe) - 1986 - *Initiation aux pratiques statistiques en géographie*. Paris, Masson, 2e ed., 189 p.
- CHEVROU (R.B.) - 1988 - *Inventaire forestier national : Méthodes et procédures*. Montpellier, IFN, Antenne Recherches, 105 p.
- COHEN (J.) - 1960 - A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*. Vol. 20, n°1 : 37-47.
- CONGALTON (R.G.) - 1988 - A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. *PE&RS*. Vol.54, n°5, may 1988 : 593-600.
- COSTER (M.), CHERMANT (J.P.) - 1985 - *Précis d'analyse d'image*. Paris, CNRS, 521 p.
- COTTEREAU (Ph.) - 1990 - *Étude d'un écosystème du Sud-Est mauritanien : évolution du peuplement et système agropastoral à l'épreuve dans la vallée de Monguel*. Université de Rouen, mémoire de maîtrise, 296 p.
- COULOMB (J.), SERRES (H.), TACHER (G.) - 1980 - *L'élevage en pays sahéliens*. Paris, PUF, 192 p. (Col. techniques vivantes).
- COUREL (M.F.) - 1985 - *Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites*. Paris, Université de Paris 1, Thèse de doctorat, 407 p.
- COUZY (A.) - 1981 - *La télédétection*. Paris, PUF, 126 p. (Col. Que-sais-je ? n°1919).
- CRAIG (R.G.) - 1979 - Autocorrelation in Landsat data. *Thirteenth international symposium on remote sensing of environment*. Ann Arbor, Michigan, 23-27 april 1979. Ann Arbor, ERIM, Vol.3 : 1517-1524.
- CUENIN (R.) - 1972 - *Cartographie générale*. T.1 Notions générales et principes d'élaboration. T.2. Méthodes et techniques de production. Paris, Eyrolles, T.1 324 p., T.2 208 p.

- DALSTED (K.J.) - 1982 - *Inventaire des ressources du Sud-Ouest mauritanien : Géologie, Sols, Forêts, Pâturages, Gestion des ressources renouvelables*. Brookings, USAID/RSI South Dakota University, USA, 319 p. + 5 cartes.
- DAUPHINE (A.), VOIRON-CANICIO (C.) - 1988 - *Variogrammes et structures spatiales*. Montpellier, GIP RECLUS, 56 p. (Col. Reclus Modes d'Emplois n°12).
- DE KEERSMAECKER (M.L.) - 1987 - Stratégie d'échantillonnage des données de terrain intégrées dans l'analyse de l'image satellitaire. *L'espace géographique*. XVI-3 : 195-205.
- DEFOURNY (P.) - 1989 - Évaluation de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne à partir des données satellitaires (Burkina Faso). *Apport de la télédétection spatiale à l'étude des paysages et des systèmes agraires tropicaux, CNRS-CEGET, Talence 25-27 octobre 1989*. TâP, 13 p.
- DELINCE (J.) - 1983 - *Estimation robuste de densité dans le plan : étude comparée de techniques d'échantillonnage, application en forêt*. Univ. Catho. de Louvain, Fac. de Sciences Agro., Thèse de doctorat, 156 p.
- DENDA (I.), WYLIE (B.) - 1988 - *Niger Pasture Assessment. Early Warning System*. TâP, sl, 21p.
- DEROO (M.), DUSSAIX (A.M.) - 1980 - *Pratique et analyse des enquêtes par sondage*. Paris, PUF, 302 p.
- DESABIE (J.) - 1966 - *Théorie et pratique des sondages*. Paris, Dunod, 480 p.
- DESCHAMPS (H.) - 1980 - Histoire de l'Afrique, des origines à 1945. in : *Encyclopædia Universalis*. Paris, E. U. ed., Vol. 1 : 345-356.
- DE WISPELAERE (G.) - 1983 - *Étude et cartographie de l'évolution de la végétation par télédétection aérospatiale*. Syst. de prod. et d'élevage au Sénégal. C.R. de fin d'étude. Maisons-Alfort, IEMVT, 140 p.
- DE WISPELAERE (G.) - 1990 - *Dynamique de la désertification au Sahel de Burkina Faso. Cartographie de l'évolution et recherches méthodologiques sur les applications de la télédétection*. Maisons-Alfort, IEMVT, 546 p.
- DE WISPELAERE (G.), GODARD (V.) - 1987 - *Projet de suivi par télédétection des ressources naturelles renouvelables dans la région de Kaédi - Sélibabi - Kankossa (Mauritanie)*. Étude thématique (2ème partie). Maisons-Alfort, IEMVT, 22 p.
- DE WISPELAERE (G.), GODARD (V.), CARRIERE (M.) - 1989 - *Expérimentation méthodologique pour le suivi de l'environnement par télédétection dans le Trarza, le Gorgol et l'Assaba (Mauritanie)*. Maisons-Alfort, IEMVT, 181 p. + 4 cartes
- DE WISPELAERE (G.), PEYRE de FABREGUES (B.) - 1988 - *Évaluation des ressources fourragères par télédétection dans la région du sud-Tamesna (Niger)*. Maisons-Alfort, IEMVT, T. I août 85, 61 p., T. II juillet 88, 74 p.
- DE WISPELAERE (G.), PEYRE de FABREGUES (B.) - 1991 - *Évaluation et suivi des ressources pastorales par télédétection spatiale dans la région du Sud-Tamesna (Niger)*. Maisons-Alfort, IEMVT, 93 p. (+ 1 vol. d'annexes).
- DIACONIS (P.), EFRON (B.) - 1983 - Méthodes de calculs statistiques intensifs sur ordinateurs. *Pour la science*. juillet 1983 : 46-58.
- DOLLÉ (V.), LERICOLLAIS (A.), RAYMOND (T. de), DANCETTE (C.), THOMÉ (M.) - 1984 - *État de l'agriculture mauritanienne et objectif d'une recherche pour son développement*. Paris, Min. des Relations Extérieures, 261 p.

- DUPLAT (P.), PERROTTE (G.) - 1981 - *Inventaires et estimations de l'accroissement des peuplements forestiers*. Paris, ONF, 432 p.
- DUREAU (F.), BARBARY (O.), MICHEL (A.), LORTIC (B.) - 1990 - *Sondages aréolaires sur image satellite pour des enquêtes socio-démographiques en milieu urbain*. Manuel de formation. Paris, ORSTOM, 15 fiches.
- ELOUARD (P.) - 1975 - Formations sédimentaires de Mauritanie atlantique. in : *Notice explicative de la carte géologique à 1/1 000 000 de Mauritanie*. Paris, BRGM : 171-233.
- EMBERGER (L.), GAUSSEN (H.), KASSAS (M.), PHILIPPIS (M. de) - 1963 - *Carte bioclimatique de la zone méditerranéenne*. Notice explicative. Paris, UNESCO-FAO, 60 p.
- Encyclopaedia UNIVERSALIS - 1991 - La Mauritanie. in : *Les chiffres du monde. Symposium*. Paris, E. U. ed. : 336-337.
- ESCADAFAL (R.) - 1989 - *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie)*. Paris, ORSTOM, 317 p. (Col. Études et Thèses).
- FAO - 1985 - *Les oasis de Mauritanie*. Atlas statistique. Rome, 103 p.
- FITZPATRICK-LINS (K.) - 1981 - Comparison of Sampling Procedures and Data Analysis for a Land-Use and Land Cover-Map. *PH&RS*. Vol. 47, n°3 : 343-351.
- FOREST (F.) - 1974 - *Bilan hydrique efficace et prospective décadaire des besoins en eau des cultures pluviales en zone soudano-sahélienne*. Paris, min. Coop., 40 p. (cahier pédagogique).
- FOURNIER (Ph.) - 1972 - *Étude sur l'utilisation du territoire. Méthodologie. Résultats 1969-1970-1971*. Paris, SCEES, 112 p. (supplément série Études n°104).
- FOURNIER (Ph.) - 1986 - *Enquête sur l'utilisation du territoire effectué en 1985 par la méthode des segments*. Paris, SCEES, Série S, 63 p. (Méthodes et Applications Scientifiques n°13).
- FOURNIER (Ph.), GILG (J.P.) - 1985a - *Télédétection et observation terrain*. Toulouse, cours du GDTA, 22 p.
- FOURNIER (Ph.), MEYER-ROUX (J.) - 1985b - Observations terrain et télédétection. *Cahier de Statistique Agricole*. n°1/6-1985 : 5-11.
- FOURNIER (Ph.), MEYER-ROUX (J.), LORTIC (M.C.), GILG (J.P.), BERTRAND (J.) - 1984 - *Utilisation du territoire et télédétection par moyens aériens légers*. Paris, SCEES (min. agriculture), 47 p. (Méthodes et Applications Scientifiques n°9).
- FRITSCHER (F.) - 1987 - *Survivre dans les sables. Mauritanie : un programme de redressement agréé par le FMI*. *Le Monde*. 24 juil. 1987.
- GDTA et SCEES - 1984 - *Simulation SPOT Lauragais, Résultats 1981*. Paris, SCEES, T.I 120 p., T.II 59 p.
- GEORGE (P.) - 1984 - *Dictionnaire de la géographie*. Paris, PUF, 3e ed., 485 p.
- GEOTECHNIP - 1970 - *Manuel de photo-interprétation*. Paris, Sec. d'Etat aux Aff. Etr., 248 p. + 6 fascicules (Col. Techniques rurales en Afrique n°11).
- GERROYANNIS (H.), LAFAGE (H.), LARCENA (D.) - 1984 - *Zonage des Bouches-du-Rhône à partir du satellite LANDSAT*. Paris, Min. Agriculture-SCEES, EHESS, 27 p.

- GODARD (V.) - 1989 - Télédétection et "enquête terrain" dans le sud-ouest mauritanien. *Apport de la télédétection spatiale à l'étude des paysages et des systèmes agraires tropicaux*. CEGET-CNRS, Talence 25-27 octobre 1989. TàP, 18 p.
- GODARD (V.), DE WISPELAERE (G.), CARRIERE (M.) - 1988 - *Projet expérimental de suivi de l'environnement par télédétection dans le Trarza et le Gorgol. Mauritanie*. Étude thématique. Maisons-Alfort, IEMVT, 29 p.
- GODARD (V.), DOLLÉ (V.), VAYSSIÈRES (J.F.) - 1990 - Un outil de diagnostic rapide pour l'agriculture oasienne. Mise au point méthodologique pour l'utilisation de données satellitaires SPOT dans la région de l'Assaba mauritanien. *Séminaire sur les systèmes agricoles oasiens. Tozeur (Tunisie) 19-21 nov.1988. Options Méditerranéennes, Sér. A/n°11*. Paris, CIHEAM/CCE DG VIII : 91-102.
- GONDARD (P.) - 1988 - *Des cartes discours pour une méthode. Cartographie de l'utilisation actuelle des sols et des paysages végétaux des Andes équatoriales*. Paris, ORSTOM, 154 p. (Col. Etudes et Thèses).
- GOURIEROUX (C.) - 1981 - *Théorie des sondages*. Paris, Économica, 272 p.
- GROSBRAS (J.M.) - 1987 - *Méthodes statistiques des sondages*. Paris, Economica, 331 p. (Col. Économie et statistique avancée).
- GROUZIS (M.) - 1988 - *Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (mare d'Oursi, Burkina Faso)*. Paris, ORSTOM, 336 p. (Col. Études et Thèses).
- HAY (A.M.) - 1979 - Sampling designs to test land use map accuracy. *PE&RS*. Vol. 45, n°4 : 529-533.
- HIERNAUX (P.H.Y.), JUSTICE (C.O.) - 1986 - Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le Sahel Malien. *International journal of remote sensing*. Vol.7, n°11, nov.86 : 1515-1531.
- HOUSEMAN (E.) - 1979 - *L'échantillonnage d'aires dans l'agriculture*. Washington DC, Statistical Reporting Service, US Dept. of Agric. 88 p. (SRS n°20).
- HUDSON (W.D.), RAMM (C.W.) - 1987 - Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement. *PE&RS*. Vol.53, n°4, avril 1987 : 421-422.
- HUETZ DE LEMPS (A.) - 1970 - *La végétation de la terre*. Paris, Masson, 133 p. (Col. Initiation aux études de géographie).
- IAT - 1989 - *Inventaires régionaux*. Flash Télé-Agri-News. Inst. des Applic. de la Téléd., Service Spécialisé Agriculture (CCRCCE), Ispra (Italie), 2/89 : 2-15.
- IFN - 1985 - *But et méthodes de l'inventaire forestier national*. Paris, IFN, 67 p.
- JAMIN (P.Y.), TOURRAND (J.F.) - 1986a - Évolution de l'agriculture et de l'élevage dans une zone de grands aménagements : Le delta du fleuve Sénégal. *Les cahiers de la Recherche Développement*. n°12 déc. 1986 : 21-34.
- JAMIN (P.Y.) - 1986b - La double culture du riz dans la vallée du fleuve Sénégal : Mythe ou réalité ? *Les cahiers de la Recherche Développement*. n°12, déc. 1986 : 44-55.
- JUSTICE (C.O.), HIERNAUX (P.H.Y.) - 1986 - Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR data : Niger 1983. *Int. J. Remote Sensing*. Vol.7, n°11 : 1475-1497.
- JUSTICE (C.O.), TOWNSHEND (J.R.G.) - 1981 - Integrating ground data with remote sensing. in : *Townshend, ed, Terrain analysis and remote sensing*. London, George Allen & Unwin : 38-58.

- KANE (A.) - 1989 - La politique géographique de la Mauritanie. *Sahel 89, Colloque Etat-Sahel, Rouen 29-30 sept. 1988. Cahiers Géographiques de Rouen*. n°32 : 133-136.
- KERSHAW (K.A.), LOONEY (J.H.H.) - 1985 - *Quantitative and dynamic plant ecology*. London, Edward Arnold, 3e ed., 282 p.
- LABAT (Ph.) - 1983 - *Les sondages : approche élémentaire*. Paris, SCEES, Séries S, 42 p. (Méthodes et Applications Scientifiques n°6).
- LACOSTE (A.), ROUX (M.) - 1971 - L'analyse multidimensionnelle en phytosociologie et en écologie. Application à des données de l'étage subalpin des alpes maritimes. I - L'analyse des données floristiques, *Æcol. Plant.*, Vol. 6, n°1 : 353-369.
- LAMARCHE (B.) - 1990 - Géographie générale. in : *Elevage et potentialités pastorales sahéliennes. Synthèses cartographiques. Mauritanie*. Maisons-Alfort, IEMVT/CTA : 1-2.
- LANDSAT . - 1979 - *Landsat data users handbook*. Sioux Falls, South Dakota (USA), US Geological Survey, np.
- LANLY (J.P.) - 1981 - *Manuel d'inventaire forestier (avec références particulières aux forêts tropicales hétérogènes)*. Rome, FAO, 200 p. (les cahiers techniques de la FAO - Etude FAO : Forêts n°27)
- LEROUX (M.) - 1983 - *Le climat de l'Afrique tropicale*. Paris, ed. Champion, 633 p.
- LEVESQUES (A.) - 1987 - *Propositions d'utilisation des satellites LANDSAT 5 (TM) et SPOT 1 pour l'inventaire et l'aménagement forestiers (Applications en forêts domaniales de Rambouillet, Saint-Germain et Trappes)*. Paris, IAURIF/ENITEF, 183 p. + annexes.
- LOCKER (M.) - 1980 - *Quelques exemples d'analyse multidimensionnelle en statistique agricole*. Paris, SCEES (min. agriculture), 119 p. (Méthodes et Applications Scientifiques n°2).
- LONG (G.) - 1974 - *Diagnostic phyto-écologique et aménagement du territoire. I. Principes généraux et méthodes*. Paris, Masson, 252 p. (Col. d'écologie n°4).
- MALEK (C.) - 1989 - *Diagnostic du paysage à partir des données satellitaires. Application au Sahel-Oudalan (Burkina Faso)*. Univ. de Paris VII, Thèse, 205 p.
- MANIERE (R.), CHAMIGNON (C.) - 1986 - Cartographie de l'occupation des terres en zone aride méditerranéenne par télédétection spatiale. Exemple d'application sur les hauts plateaux oranais : Méchéria au 1/200 000. *Ecologica Mediterranea*. Tome XII, fasc. 1-2 : 159-185.
- MATHERON (G.) - 1970 - *La théorie des variables régionalisées et ses applications*. Paris, Ecoles des mines, 212 p.
- MESTRAUD (J.L.) - 1975 - Le cadre géologique. in : *Notice explicative de la carte géologique à 1/1 000 000 de Mauritanie*. Paris, BRGM : 15-68.
- MEYER-ROUX (J.) - 1981a - Estimation des surfaces cultivées à partir des données LANDSAT et des enquêtes de terrain. *Cahiers de Statistique Agricole*. n°1/6, janvier-février 1981 : 13-16.
- MEYER-ROUX (J.), SIGMAN (R.), CRAIG (M.), OZGA (M.) - 1981b - Estimation des superficies à l'aide des données LANDSAT et de l'enquête TER-UTI. *Cahiers de Statistique Agricole*. n°5/6, septembre-octobre 1981 : 11-17.
- MEYER-ROUX (J.), SIGMAN (R.), CRAIG (M.), OZGA (M.) - 1981c - Cartographie et statistique en télédétection. - *Cahier de Statistique Agricole*. n°6/6 nov.-déc. 1981 : 9-14.

- MICHEL (P.) - 1973 - *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique*. Paris, ORSTOM, 3 tomes, 752 p. + cartes (Mémoire ORSTOM n°63).
- MICHEL (P.) - 1984 - Les variations du climat au quaternaire récent dans le Sahel d'Afrique occidentale et leurs conséquences sur les formations superficielles, l'hydrologie et la pédogénèse. in : *La sécheresse au Sahel. Bul. Soc. Languedocienne de Géographie*. T. 18, fas. 3-4, juil. déc. 1984 : 125-137.
- MIETTON (M.) - 1988 - *Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'érosion en zone de savane*. Thèse de l'Université de Grenoble, 511 p.
- MILNE (A.) - 1959 - The centric systematic area sample treated as a random sample. *Biometrics*. Vol. 15, n°2 : 270-297.
- Ministère de la coopération. - 1980 - *Mémento de l'agronome*. Paris, min. coopération, 3ème édition, 1600 p. (Col. Techniques Rurales en Afrique).
- MOSNIER (M.) - 1961 - *Pâturages naturels sahéliens : Région de Kaédi (Mauritanie)*. Maisons-Alfort, IEMVT, 157 p. + 2 cartes.
- NASI (R.), SABATIER (M.) - 1988 - *Projet inventaire des ressources ligneuses au Mali. Rapport technique première phase. Inventaire des formations végétales*. Nogent/Marne, CTFT, 115 p.
- NOUGIER (J.) - 1977 - Géologie. in : *Atlas de la République Islamique de Mauritanie*. Paris, Jeune Afrique ed. : 8-9.
- NUMELEC . - 1987 - *Périorcolor 2001*. Logiciel Géopériorcolor. La verrière, MSII, sp.
- ORSINI (J.P.G.), NANKIVELL (E.) - 1989 - *Summer Pack*, version 01. South Perth (Western Australia), department of agriculture, 81 p.
- OULD EL HACEN (M.) - 1989 - L'Adrar mauritanien : de l'ère des échanges à l'enclavement. *Colloque Etat-Sahel. Rouen 29-30 septembre 1988. Cahiers Géographiques de Rouen*. n°32 : 137-143.
- PAGNEY (P.) - 1976 - *Les climats de la terre*. Paris, Masson, 150 p.
- PAIN-ORCET (M.), JEANJEAN (H.), NASI (R.) et alii - 1989 - *Téledétection spatiale et inventaires forestiers*. Nogent/Marne, CTFT/IGN/IFN, 75 p.
- PARINGAUX (R.P.) - 1990 - Esclaves oubliés. *Le Monde*. 23 oct. 1990.
- PASTORELLI (R.) - 1986 - Statistique d'occupation du sol à partir d'images satellites. *Cahiers de Statistiques Agricoles*. n°1/6 janvier-février 1986 : 7-12.
- PAUL (S.), ALOUGES (A.), BONNEVAL (H.), PONTIER (L.) - 1982 - *Dictionnaire de télédétection aérospatiale*. Paris, Masson, 236 p.
- PIQUEMAL-PASTRE (M.) - 1980 - Mauritanie. in : *Encyclopædia Universalis*. Paris, E. U. ed., Vol. 10 : 634-637.
- PRINCE (S.D.), ASTLE (W.L.) - 1986 - Satellite remote sensing of rangelands in Botswana. I. Landsat MSS and herbaceous vegetation. *Int. J. Remote Sensing*. Vol. 7, n°11 : 1533-1553.
- ROSENFELD (G.H.) - 1982 - Sample Design for Estimating Change in Land Use and Land Cover. *PH&RS*. Vol. 48, n°5 : 793-801.

- ROSENFELD (G.H.), FITZPATRICK-LINS (K.) - 1986 - A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *PH&RS*. Vol.52, n°2, feb. 1986 : 223-227.
- SAINT (G.) - 1988 - Bilan des développements méthodologiques sur les inventaires agricoles utilisant SPOT et des enquêtes de terrain. *SPOT 1, Utilisation des images, Bilans, Résultats*. Paris 23-27 nov.1987. Toulouse, Cépadués : 245-250.
- SAS - 1989 - *SAS/STAT User's guide*. Cary (NC), SAS Institute, 6th. vers., 4th ed., Vol. 1, 943 p.
- SCEES - 1987 - *Enquête "Segments" 1987 liée à la télédétection. Instructions aux enquêteurs*. Paris, SCEES (min. agriculture), 6 p.
- SECK (S.M.), LERICOLLAIS (A.) - 1986a - Aménagement hydro-agricole et systèmes de production dans la vallée du Sénégal. *Les cahiers de la Recherche Développement*. n°12, déc.86 : 3-10.
- SECK (S.M.) - 1986b - La maîtrise de l'eau et la restructuration sociale induite par l'organisation de la production irriguée dans le bassin du fleuve Sénégal. *Les cahiers de la Recherche Développement*. n°12 déc. 1986 : 13-20.
- SNEDECOR (G.W.), COCHRAN (W.G.) - 1971 - *Méthodes statistiques*. Paris, Assoc. de Coord. Tech. Agricole, 6e ed., 649 p.
- SPOT - 1986 - Guide des utilisateurs des données SPOT. Toulouse, CNES/SPOT IMAGE, Vol. 1 Manuel de référence, Vol.2 Guide pratique, np.
- STANSELL (A.T. Jr) - 1988 - Perspectives GPS. *Géomètre*. n°3, mars 1988 : 58-63.
- TAINÉ-CHEIKH (C.) - 1988 - *Dictionnaire Hassaniyya Français*. Paris, Geuthner, 6 volumes.
- THIAM (A.) - 1989 - L'état et la lutte contre la désertification en Mauritanie. *Sahel 89, Colloque Etat-Sahel, Rouen 29-30 sept. 1988. Cahiers Géographiques de Rouen*. n°32 : 61-65.
- TODD (W.J.) - 1980 - Landsat wildland mapping accuracy. *PE&RS*. Vol.46, n°4, avril 1980 :509-520.
- TORTORA (R.D.) - 1978 - A note on sample size estimation for multinomial populations. *The American Statistician*. Vol. 32, n°3 : 100-102.
- TOUPET (Ch.) - 1966 - *Étude du milieu physique de l'Assaba (Mauritanie). Introduction à la mise en valeur d'une région sahélienne*. Dakar, IFAN, 158 p. (Initiations et Études Africaines n°20).
- TOUPET (Ch.) - 1973 - L'évolution du climat de la Mauritanie du Moyen-Age à nos jours. - *Les problèmes de la désertification au sud du Sahara. Le cas de la Mauritanie. Colloque international de Nouakchott 17-19 déc.1973*. Nouakchott, Ambassade de France, 17 p.
- TOUPET (Ch.) - 1977 - *La Mauritanie*. Paris, PUF, 125 p. (Col. Que-sais-je ? n°1684).
- TOUPET (Ch.) - 1984 - Signification de la récente sécheresse qui a sévi dans le Sahel. in : *La sécheresse au Sahel. Bul. Soc. Languedocienne de Géographie*. T. 18, Fasc. 3-4, juil. déc. 1984 : 139-145.
- TOUPET (Ch.) - 1990 - La perception des climats secs. - *Sécheresse*. Vol. 1, n°1 : 240-245.
- TOUZELET (M.), MEYER-ROUX (J.), JOANNARD (M.) - 1983 - Enquête sur l'utilisation du sol par la méthode des segments. Ardèche 1982. *Cahiers de Statistique Agricole*. n°2/6, mars-avril 1983 : 9-16.
- TROCHAIN (J.L.) - 1957 - Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique tropicale. *Bull. Inst. Etud. Centrafr. Brazzaville*. n°13-14 : 55-93.

VERGER (F.) - 1982 - *L'observation de la terre par les satellites*. Paris, Presses Universitaires de France, 128 p.
(Col. Que sais-je n°1989).

WYLIE (B.), HARRINGTON (J.), PIEPER (R.), MAMAN (A.), DENDA (I.) - 1988 - *1987 pasture assessment early warning system. Research on satellite-based pasture assessment, implementation techniques*. Niamey, Ministère des ressources animales/USAID, 34 p.

Table des matières

INTRODUCTION	1
MISE AU POINT TERMINOLOGIQUE.....	9
 PREMIÈRE PARTIE - L'homme et le milieu.....	 15
1. L'HOMME ET LE TROUPEAU	17
1.1. ÉVOLUTION DU PEUPEMENT MAURITANIEN.....	17
1.1.1. Rappel historique.....	18
1.1.2. Migrations internes, sédentarisation et conflit.....	21
1.2. ASPECTS SOCIAUX	23
1.2.1. Mise en valeur du terroir agropastoral.....	23
1.2.2. Perspectives.....	25
 2. LE CLIMAT	 27
2.1. UNE INCONTESTABLE PÉJORATION.....	27
2.1.1. Un climat marqué par l'alternance saisonnière.....	29
2.1.2. Péjoration climatique.....	31
2.1.2.1. Contexte historique.....	32
2.1.2.2. Profil pluviométrique des trois zones d'étude.....	33
2.2. INFLUENCE MAJEURE DES PRÉCIPITATIONS.....	40
2.2.1. Précipitations et périodes actives de végétation.....	41
2.2.2. Période optimale d'inventaire et analyse de la pluviométrie.....	42
2.2.2.1. Période optimale et moyenne décadaire.....	43
2.2.2.2. Période optimale et pluviosité probable.....	46
2.2.2.3. Autres méthodes.....	52
 3. LE MODELÉ ET LA VÉGÉTATION.....	 55
3.1. DES PAYSAGES CONTRASTÉS.....	55
3.1.1. La zone pilote de Rosso.....	56
3.1.2. La zone pilote de Lekseïba.....	58
3.1.3. La zone pilote de Kouroudjel et El Fa'iya.....	60
3.2. LES FORMATIONS VÉGÉTALES SPONTANÉES	62
3.2.1. La zone pilote de Rosso.....	64
3.2.2. La zone pilote de Lekseïba.....	68
3.2.3. La zone pilote de Kouroudjel et El Fa'iya.....	70
3.3. LES CULTURES.....	72
3.3.1. Les principaux types de culture	72
3.3.1.1. Les cultures pluviales	73
3.3.1.2. Les cultures de décrue.....	74
3.3.1.3. Les cultures irriguées.....	75
3.3.2. Inventaire et calendrier agricole.....	78
 DEUXIÈME PARTIE - Contexte et objectifs méthodologiques.....	 87
4. MÉTHODES USUELLES D'ENQUÊTE ET DE TRAITEMENT	89
4.1. POURQUOI SONDER ?	89
4.1.1. Un échantillon représentatif.....	90
4.1.2. La base de sondage	92
4.1.2.1. Une documentation obsolète	92
4.1.2.2. L'imagerie satellitaire.....	95

4.2. CHOIX D'UNE MÉTHODE DE SONDAGE	99
4.2.1. Échantillonnages empiriques	100
4.2.2. Échantillonnages probabilistes	102
4.2.2.1. Formes de l'unité d'observation	103
4.2.2.2. Sélection d'un mode de tirage	107
4.3. VALORISER L'ENQUÊTE DE TERRAIN.....	111
4.3.1. Améliorer la précision des statistiques.....	114
4.3.1.1. La stratification.....	115
4.3.1.2. Le tirage systématique.....	116
4.3.1.3. Le sondage à plusieurs degrés.....	119
4.3.1.4. Apport d'une informations exogènes.....	120
4.3.2. La cartographie et son évaluation.....	129
4.3.2.1. Les classifications non supervisée	130
4.3.2.2. Les Classifications supervisées.....	132
4.3.2.3. Le contrôle de la classification.....	133
5. INVENTAIRE EN ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES	143
5.1. BILAN DE QUELQUES EXPÉRIENCES	143
5.1.1. Description de quelques méthodes d'enquête.....	143
5.1.1.1. Choix de l'échantillon.....	144
5.1.1.2. Validation des résultats.....	147
5.1.2. Critique des méthodes pratiquées en milieu aride et semi-aride.....	149
5.2. SPÉCIFICITÉS DE L'INVENTAIRE PASTORAL.....	151
5.2.1. Finalité et niveau d'intervention	151
5.2.2. Collecte des données et description d'un pâturage.....	153
5.2.3. Télédétection et inventaire pastoral	160
6. MISE EN PLACE DU SONDAGE.....	167
6.1. NOMBRE ET RÉPARTITION DES UNITÉS D'ENQUÊTE	167
6.1.1. Quelques estimateurs.....	167
6.1.1.1. Présentation.....	168
6.1.1.2. Discussion	174
6.1.2. Taille de l'échantillon et contraintes de terrain.....	175
6.1.2.1. Problèmes pratiques.....	175
6.1.2.2. Recherche sur les parcelles naturelles.....	183
6.1.3. Répartition des segments.....	189
6.2. MÉTHODE RETENUE	192
6.2.1. Tirage de l'échantillon	193
6.2.2. Réalisation	199
6.2.3. Nomenclature et niveau d'observation.....	200
6.3. LOCALISATION ET AIRES MINIMALES D'OBSERVATION.....	202
6.3.1. Les nouveaux moyens de localisation.....	202
6.3.2. Aire minimale d'observation.....	204
6.3.2.1. Précision de la documentation satellitaire analogique.....	204
6.3.2.2. Précision du document satellitaire numérique.....	205
6.3.2.3. Justification de l'aire minimale d'observation	208
6.4. APPORTS D'UN SONDAGE À DEUX DEGRÉS	213
6.4.1. Lorsque quantifier devient nécessaire.....	214
6.4.2. Du théorique au possible	216

TROISIÈME PARTIE - Applications	223
7. LES PRÉPARATIFS ET LE DÉPOUILLEMENT DE L'ENQUÊTE	225
7.1. LA STRATIFICATION	225
7.1.1. Stratification préalable.....	225
7.1.1.1. Sélection des canaux	226
7.1.1.2. Classifications automatiques.....	228
7.1.2. Strates et masques	239
7.2. TAILLE ET STRUCTURE DU "PARCELLAIRE".....	247
7.2.1. Détermination de la taille du parcellaire	247
7.2.1.1. Analyse des formes	247
7.2.1.2. Trois situations	249
7.2.2. Analyse morphologique.....	260
7.3. LE DEPOUILLEMENT DE L'ENQUÊTE.....	268
7.3.1. Le temps d'enquête.....	268
7.3.2. La fiche d'enquête et le pixel.....	270
7.3.2.1. Analyse de la fiche d'enquête.....	270
7.3.2.2. La nomenclature retenue	273
7.3.2.3. Affectation des thèmes aux pixels	275
8. LA CARTOGRAPHIE D'OCCUPATION DU SOL	281
8.1. RÈGLES D'ANALYSE.....	281
8.1.1. Description des parcelles d'initialisation.....	281
8.1.2. Sélection des parcelles d'initialisation.....	284
8.2. DE LA CLASSIFICATION À LA CARTE.....	291
8.2.1. Étalonnage au niveau des segments.....	292
8.2.2. Extrapolation à la zone pilote	297
8.3. ÉVALUATION DES RÉSULTATS	298
8.3.1. Quels contrôles ?	298
8.3.2. Évaluation des classifications	300
8.3.2.1. Les matrices de confusion.....	300
8.3.2.2. Indices de précision.....	303
9. LES STATISTIQUES	309
9.1. LES ESTIMATIONS	309
9.1.1. Formulaire opérationnels.....	309
9.1.2. Les superficies	312
9.1.2.1. Au niveau des segments.....	312
9.1.2.2. Au niveau des zones pilotes.....	316
9.2. EXTRAPOLATION EN L'ABSENCE DE DONNÉES SATELLITAIRES	320
9.2.1. Formulaire opérationnels.....	322
9.2.2. Les résultats	323
9.3. EFFICACITÉ DES DIFFÉRENTES MÉTHODES.....	328
9.3.1. Avec ou sans l'estimateur par la régression.....	328
9.3.1.1. Comparaison des coefficients de variation	329
9.3.1.2. Efficacité des corrections par régression.....	331
9.3.2. Limites des statistiques issues de la classification	333
9.4. INTERPRÉTATION THÉMATIQUE.....	335
9.4.1. Diagnostic de l'état de l'environnement à l'issue de la saison des pluies 1987 (zone pilote de Rosso).....	337
9.4.2. Diagnostic de l'état de l'environnement à l'issue de la saison des pluies 1987 (zone pilote de Lekseiba).....	338

CONCLUSION GÉNÉRALE.....	345
ANNEXE 1 - Disponibilité et coût des prises de vue.....	353
ANNEXE 2 - Les paramètres images	357
ANNEXE 3 - Les précipitations.....	361
ANNEXE 4 - Localisation des segments	373
ANNEXE 5 - Variance & stratification	379
ANNEXE 6 - Descriptif des unités d'occupation du sol.....	387
ANNEXE 7 - Détail des résultats statistiques.....	407
ANNEXE 8 - Implantation des sites de suivi	419
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	423

Table des tableaux

tableau 2.1 - Températures minimales et maximales (moyennes mensuelles).....	29
tableau 2.2 - Humidité relative minimale et maximale (moyennes mensuelles).....	30
tableau 2.3 - Seuils interquintiles.....	36
tableau 2.4 - Comparaison inter-phases du déficit pluviométrique.....	40
tableau 4.1 - Possibilités mensuelles d'images.....	98
tableau 4.2 - Matrice de confusion.....	134
tableau 6.1 - Taille de l'échantillon en fonction du coefficient de variation.....	169
tableau 6.2 - Nombre d'unités d'enquête (méthode binomiale).....	170
tableau 6.3 - Nombre d'unités d'enquête (méthode multinomiale).....	171
tableau 6.4 - Aires minimales absolues d'observation.....	210
tableau 7.1 - Paramètres des axes factoriels.....	228
tableau 7.2 - Pourcentage de parcelles restant après seuillage en fonction de l'aire minimale retenue.....	251
tableau 7.3 - Nombre de parcelles médianes par segments.....	252
tableau 7.4 - Caractéristique d'occupation du sol du segment K5D.....	278
tableau 8.1 - Paramètres de classification calculés sur les parcelles d'initialisation (zone pilote de Rosso).....	286
tableau 8.2 - Paramètres de classification calculés sur les parcelles d'initialisation (zone pilote de Lekseiba).....	287
tableau 8.3 - Matrice de confusion (zone pilote de Rosso).....	301
tableau 8.4 - Matrice de confusion (zone pilote de Lekseiba).....	302
tableau 8.5 - Précision des différents estimateurs (zone pilote de Rosso).....	303
tableau 8.6 - Précision des différents estimateurs (zone pilote de Lekseiba).....	304
tableau 9.1 - Principaux paramètres d'analyse (zone pilote de Rosso).....	313
tableau 9.2 - Principaux paramètres d'analyse (zone pilote de Lekseiba).....	314
tableau 9.3 - Superficies estimées par régression (zone pilote de Rosso).....	318
tableau 9.4 - Superficies estimées par régression (zone pilote de Lekseiba).....	319
tableau 9.5 - Superficies estimées sans régression (zone pilote de Rosso).....	324
tableau 9.6 - Superficies estimées sans régression (zone pilote de Lekseiba).....	325
tableau 9.7 - Comparaison des précisions relatives (zone pilote de Rosso).....	329
tableau 9.8 - Comparaison des précisions relatives (zone pilote de Lekseiba).....	330
tableau 9.9 - Efficacité de la télédétection (zone pilote de Rosso).....	332
tableau 9.10 - Efficacité de la télédétection (zone pilote de Lekseiba).....	332
tableau 9.11 - Validité des mesures de surfaces obtenues sur la classification (zone pilote de Rosso).....	333
tableau 9.12 - Validité des mesures de surfaces obtenues sur la classification (zone pilote de Lekseiba).....	334
tableau 9.13 - Statistiques d'occupation du sol (zone pilote de Rosso).....	337
tableau 9.14 - Statistiques d'occupation du sol (zone pilote de Lekseiba).....	339
tableau A.1.1 - Disponibilité catalogue de l'imagerie satellitaire.....	354
tableau A.1.2 - Coût d'acquisition des prises de vue.....	355
tableau A.2.1 - Caractéristiques satellitaires et radiométriques de la zone pilote de Rosso.....	358
tableau A.2.2 - Caractéristiques satellitaires et radiométriques de la zone pilote de Lekseiba.....	359
tableau A.2.3 - Caractéristiques satellitaires et radiométriques de la zone pilote des oasis.....	360
tableau A.3.1 - Précipitations mensuelles à Rosso (1940-1989).....	363

tableau A.3.2 - Précipitations mensuelles à Kaédi (1940-1989).....	364
tableau A.3.3 - Précipitations mensuelles à Kiffa (1940-1989).....	365
tableau A.3.4 - Précipitations décennales à Rosso (1968-1989).....	366
tableau A.3.5 - Précipitations décennales à Kaédi (1968-1989).....	368
tableau A.3.6 - Précipitations décennales à Kiffa (1968-1989).....	370
tableau A.5.1 - Évolution de la variance inter et intra-classes (zone pilote de Rosso).....	380
tableau A.5.2 - Évolution de la variance inter et intra-classes (zone pilote de Lekseiba).....	381
tableau A.5.3 - Évolution de la variance inter et intra-classes (zone pilote des oasis).....	382
tableau A.7.1 - Effectifs en pixels des différents thèmes comptabilisés par segment sur le terrain et la classification (zone pilote de Rosso).....	414
tableau A.7.2 - Résultats aux différentes étapes des calculs d'estimation des superficies (zone pilote de Rosso).....	415
tableau A.7.3 - Effectifs en pixels des différents thèmes comptabilisés par segment sur le terrain et la classification (zone pilote de Lekseiba).....	416
tableau A.7.4 - Résultats aux différentes étapes des calculs d'estimation des superficies (zone pilote de Lekseiba).....	417

Table des figures et planches photographiques

figure 0.1 - Localisation des zones d'étude.....	5
figure 0.2 - Le segment et ses subdivisions.....	12
figure 1.1 - Répartitions des différents groupes ethniques.....	20
figure 2.1 - Volume moyen mensuel des précipitations.....	28
figure 2.2 - Variations interannuelles des précipitations.....	35
figure 2.3 - Diagrammes pluviométriques lissés (moyenne mobile avec un pas de 7 ans).....	37
figure 2.4 - Détermination de la période des pluies utiles.....	44
figure 2.5 - Régimes pluviométriques probables.....	49
figure 3.1 - Les grands ensembles géologiques de la Mauritanie.....	56
figure 3.2 - Les grands traits du paysage végétal.....	65
figure 3.3 - Terminologie et localisation des principaux terroirs de cultures.....	75
figure 4.1 - Documentation cartographique et photographique disponible à l'IGN.....	93
figure 4.2 - Un tirage aléatoire élémentaire.....	108
figure 4.3 - Un tirage systématique aligné.....	109
figure 4.4 - Un tirage systématique non aligné.....	109
figure 4.5 - Résumé de la procédure d'échantillonnage.....	110
figure 4.6 - La zone d'étude et les segments.....	122
figure 4.7 - Relations bi-univoques de la forme $y=ax+b$ où $b=0$	123
figure 4.8 - Estimateur par la régression, la droite des moindres carrés.....	125
figure 5.1 - Répartition des placeaux de coupe de biomasse.....	159
figure 6.1 - Effectif de l'échantillon par moyenne successive.....	172
figure 6.2 - Cheminement théorique à l'intérieur du segment.....	179
figure 6.3 - Implantation des segments, phase pratique.....	195
figure 6.4 - Renforcement de l'échantillon.....	196
figure 7.1 - Evolution de la variance inter et intra-strates sur la première composante principale.....	232
figure 7.2 - Résultats des classifications automatiques de la zone pastorale de Rosso.....	235
figure 7.3 - Résultats des classifications automatiques de la zone agropastorale de Lekseïba.....	237
figure 7.4 - Exemples de stratifications automatiques pour Rosso et Lekseïba.....	243
figure 7.5 - Images tests et parcellaire de cultures irriguées (zone pilote de Rosso).....	245
figure 7.6 - Strates et parcellaire de palmeraies.....	257
figure 7.7 - Variogrammes d'un secteur dunaire de Rosso.....	262
figure 7.8 - Variogramme global non lissé (zone pilote de Rosso).....	265
figure 7.9 - Variogramme global lissé (zone pilote de Rosso).....	266
figure 7.10 - Variogramme calculé avec un pas de 10 (zone pilote de Rosso).....	267
figure 8.1 - Fréquence des parcelles par groupe de taille.....	283
figure 8.2 - Graphe bidimensionnel (zone pilote de Rosso).....	289
figure 8.3 - Graphe bidimensionnel (zone pilote de Lekseïba).....	290
figure 8.4 - Carte d'occupation du sol de Rosso.....	293
figure 8.5 - Carte d'occupation du sol de Lekseïba.....	295
figure 9.1 - Graphe de la relation superficie-coefficient de variation (zones pilotes de Rosso et Lekseïba associées).....	327

figure A.4.1 - Répartition des segments sur la composition colorée de la zone pilote de Rosso	375
figure A.4.2 - Répartition des segments sur la composition colorée de la zone pilote de Lekseiba	377
figure A.5.1 - Composition des strates de la zone pilote de Rosso	383
figure A.5.2 - Composition des strates de la zone pilote de Lekseiba	384
figure A.5.3 - Composition des strates de la zone pilote des oasis	385
figure A.8.1 - Les sites de suivi (zone pastorale de Rosso)	421
figure A.8.2 - Les sites de suivi (zone agropastorale de Lekseiba)	422

planche photo 3.1 - Cultures ou végétation spontanée ?	80
--	----

planche photo 6.1 - La différence de contraste des documents de terrain	197
---	-----

