IMAGES SPATIALES ET PAYSAGES SAHELIENS

Yveline PONCET

Éditions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

IMAGES SPATIALES ET PAYSAGES SAHELIENS

Une étude régionale des milieux naturels par télédétection
Azawagh, République du Niger

Yveline PONCET

IMAGES SPATIALES ET PAYSAGES SAHELIENS

Une étude régionale des milieux naturels par télédétection
Azawagh, République du Niger

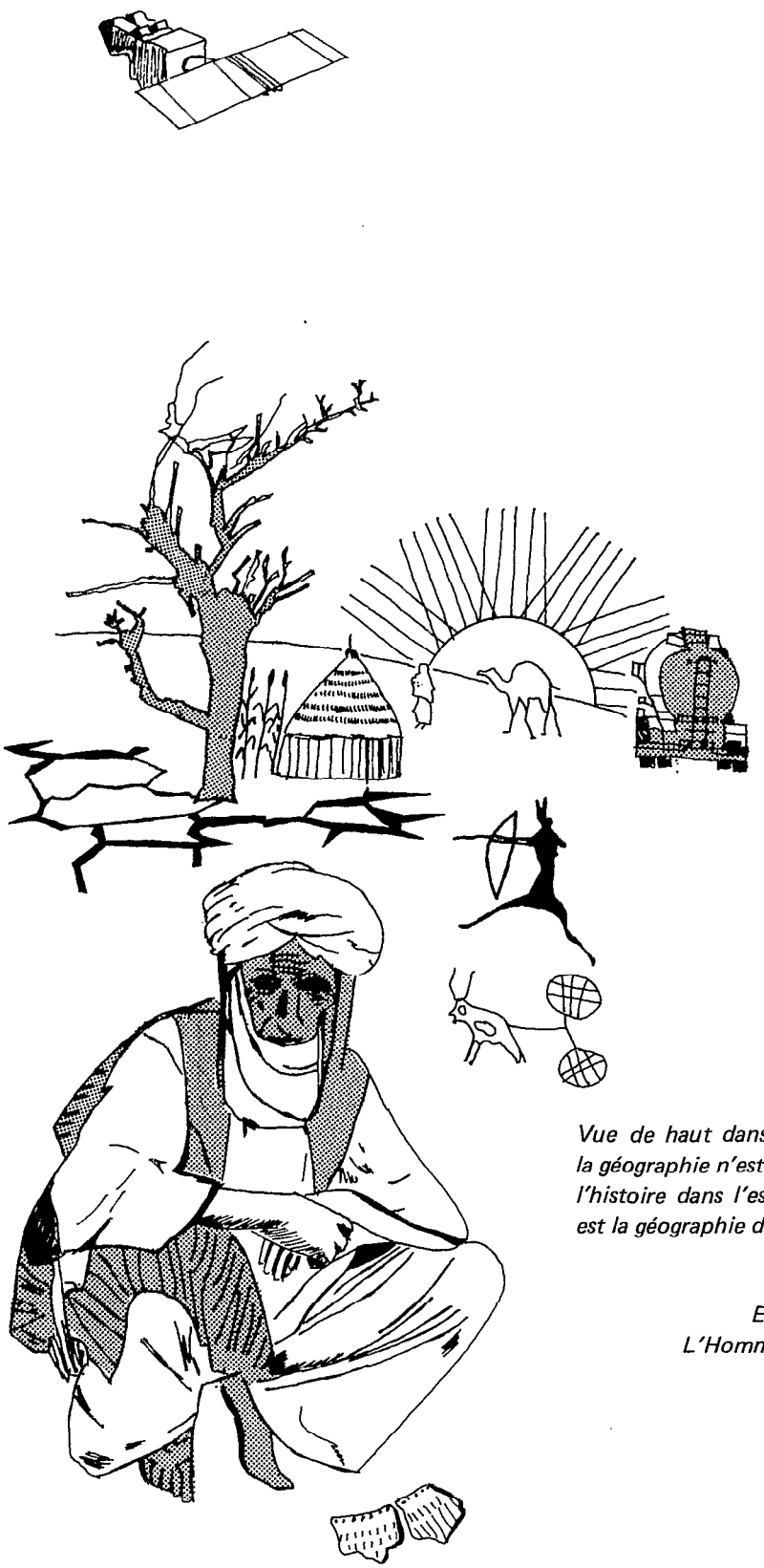
Éditions de l'ORSTOM
INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION
Collection **TRAVAUX et DOCUMENTS** n° 200
PARIS 1986

«La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une «part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et «non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes «citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction «intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou «ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

«Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc «une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal».

ISSN : 0371-6023
ISBN : 2-7099-0818-2

© ORSTOM 1986



Vue de haut dans ses rapports avec l'homme, la géographie n'est pas autre chose que l'histoire dans l'espace, de même que l'histoire est la géographie dans le temps.

Elisée Reclus,
L'Homme et la Terre, 1906

RÉSUMÉ

A travers la présentation d'une opération de télédétection spatiale appliquée à une recherche géographique en milieu tropical aride et semi-aride, IMAGES SPATIALES ET PAYSAGES SAHELIENS expose l'usage qui peut être fait des données de télédétection en vue de l'inventaire régional de territoires vastes et encore insuffisamment connus dans certains de leurs aspects.

On s'est attaché à analyser les problèmes d'utilisation et les difficultés de mise en œuvre et d'interprétation, en proposant des solutions et en faisant une critique des résultats. Des exemples nombreux décrivent la variété et la cohérence des paysages de l'Azawagh et la façon dont leurs éléments sont restitués — ou ne sont pas restitués — par les images des capteurs Landsat, Météosat et de simulation Spot. C'est donc l'étude des milieux naturels dans une région du Sahel ouest-africain et l'étude de leur évolution (évolution saisonnière et inter-annuelle, paléo-environnements) qui accompagne et sert de support à une étude méthodologique sur l'exploitation des images spatiales.

ABSTRACT

"IMAGES SPATIALES ET PAYSAGES SAHELIENS" shows how remote sensing data can be used to draw up a regional inventory of vast and still badly known territories by taking as an example a geographical research conducted under arid and semi-arid tropical conditions through space remote sensing.

One has been very particular about analysing the problems concerning their use, their difficult implementation and interpretation by proposing some solutions and criticizing the results. Numerous examples show the diversity and coherence of the Azawagh landscapes and how they are transmitted or not by the LANDSAT, METEOSAT and SPOT simulation sensors. Therefore, a methodological study on the use of space images is based on the study of the natural environments in a zone of the West African Sahel and on the study of their evolution (seasonal and interannual evolution, paleoenvironments).

РЕЗЮМЕ

В статье КОСМИЧЕСКАЯ ФОТОС'ЕМКА И АФРИКАНСКИЙ ПРИБРЕЖНЫЙ ЛАНДШАФТ, описывающей применение космического дистанционного обнаружения при географическом изучении засушливых и полузасушливых тропических районов, показывается, каким образом данные дистанционного обнаружения могут быть использованы при региональном описании обширных территорий, некоторые аспекты которых еще недостаточно хорошо изучены.

Предпринимается попытка анализа проблем использования, трудностей осуществления и интерпретации, предлагаются некоторые решения и дается критическая оценка результатов. Многочисленные примеры иллюстрируют общие черты и различия ландшафтов Азавага, а также метод, с помощью которого были получены - или не получены - их составные элементы в виде снимков, выполненных датчиками "Ландсат", "Метеосат" и моделирующим устройством "Спот". Таким образом, речь идет об изучении территорий в прибрежных районах Западной Африки и их изменений /сезонные и годовые изменения, палеотипные изменения/, которое служит основой и дополняет методологическое изучение возможностей использования космической фотосъемки.

الملخص :

* خلال دراسة للجغرافيا الطبيعية بالمناطق الاستوائية الجافة والنصف جافة باستخدام الاستشعار من بعد (Télédétection) أوضحت الصور الفضائية والطبوغرافيا الساحلية امكانية استخدام بيانات ومعلومات الاستشعار من بعد لحصر مناطق شاسعة المساحات ـ ذات ملامح لم يسبق دراستها .
* ولقد أتجهنا في هذا البحث الى تحليل صعوبات أستخدام الصور الفضائية وتفسير النتائج المستخلصة منها وذلك مع عرض ونقد للنتائج ،تقديم اقتراحات لحل هذه الصعوبات وتوضيح عديد من الامثلة التي تصف الاختلاف والتشابه بين الملامح الطبوغرافية لمنطقة أزوّا (Azawagh) وطبيعة تركيبتها بالصور الفضائية المختلفة : لاندسات ،ميتوسات والاسبوت .
(Landsat, Météosat, Spot)
* ويعتبر هذا البحث دراسة للبيئات الطبيعية وتغييراتها (الموسمية والسنوية والطويلة المدى) بالساحل الافريقي الغربي ، كما يقدم هذا البحث نموذجا لاسلوب أستخدام الصور الفضائية .

MOTS-CLÉS

(d'après les listes des *thèmes classés* et des *pays classés,* INTERGEO, 1984)

ANALYSE REGIONALE

CARTOGRAPHIE

DEVELOPPEMENT

ECOLOGIE

ELEVAGE ET VIE PASTORALE

FORMATIONS SUPERFICIELLES

GEOGRAPHIE PHYSIQUE

MILIEU NATUREL ET PAYSAGE

PALEOGEOGRAPHIE

QUATERNAIRE

SOUS-DEVELOPPEMENT

TELEDETECTION

ZONE ARIDE

ZONE TROPICALE

AFRIQUE AU SUD DU SAHARA

NIGER

SAHEL

Les travaux ont été réalisés avec l'aide des organismes suivants :

Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Paris

Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Paris

Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM), Paris

Institut de Recherche en Sciences Humaines (IRSH), Niamey

Ministère des Relations Extérieures, Coopération et Développement (Paris)

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (Niamey)

Université de Niamey, République du Niger

Les données Landsat et les données Météosat sont issues de la téléthèque de l'Atelier de Télédétection de l'Orstom à Bondy, les données Spot sont issues de la téléthèque du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.

Les traitements photographiques et les traitements numériques des données ont été effectués à l'Atelier de Télédétection de l'Orstom à Bondy avec la collaboration de Annick Aing, Bernard Lortic, Catherine Mering, Jacques Noël, Isabelle Rannou, Lorenzo Vercesi.

Dessins, croquis, cartes : Yveline Poncet

Photographies : Edmond Bernus, Yveline Poncet

Couverture :

Vue Landsat MSS du 10 Novembre 1972, trace 207, rang 048 : image photographique, composition colorée canaux 4, 5 et 7, zone du coude de l'Azawagh (16°25′ de latitude environ). Le Nord se trouve vers la droite.

En carton : jardins à Marandet, arrondissement d'Agadez, Niger, Novembre 1980.

AVANT-PROPOS

Avant d'aborder le détail de l'étude des pays de l'Azawagh par télédétection spatiale, il paraît utile de replacer le sujet dans le contexte général de l'évolution de la *TELEDETECTION SPATIALE POUR L'OBSERVATION DE LA TERRE,* depuis moins de quinze années qu'elle existe.

A l'instar des disciplines qui s'appuient sur une technologie très élaborée, la télédétection spatiale évolue avec une grande rapidité : les moyens qu'elle utilise couramment (applications de théories mathématiques et statistiques, logiciels, matériels informatiques, optiques et photochimiques) sont de plus en plus nombreux et performants et leur utilisation ouvre, de mois en mois, de nouvelles perspectives ; partant, c'est à la télédétection spatiale elle-même que s'ouvrent sans cesse de nouveaux concepts, de nouvelles méthodes, de nouvelles expérimentations : les travaux dans cette discipline, qu'ils soient « appliqués » ou « fondamentaux », restituent alors, au moment de leur publication, un état déjà lointain, en deçà des procédures qui sont actuellement en cours d'expérimentation ou en cours d'approche.

Les pages qui suivent décrivent une opération de recherche *EN* télédétection et *PAR* télédétection, dont on pourrait penser qu'elle est simpliste, auprès des subtiles méthodes expérimentées actuellement. Commencée en 1980 et achevée en 1983, complétée en 1984 et 1985, cette étude décrit l'exploitation des données photographiques des satellites Landsat 1 et 2, Météosat 1, et d'une simulation Spot. On verra plus loin que la simplicité des procédures choisies relève d'un parti-pris et que l'un des soucis des opérateurs a été d'expérimenter et d'appliquer des méthodes et des moyens aisément reproductibles et praticables dans les lieux et par les institutions qui ne disposent pas couramment de moyens importants ou sophistiqués pour traiter les images spatiales.

Notre étude appartient à ce qu'on pourrait appeler une « première phase » de la télédétection spatiale : elle utilise les données dites « de première génération » que sont celles des Satellites Landsat 1 (lancé en juillet 1972) et Landsat 2 (lancé en janvier 1975) et nous ne leur avons appliqué que des traitements simples, aussi bien sur le plan des procédés photographiques que sur celui des procédés numériques.

En même temps que cette étude était poursuivie, la télédétection spatiale progressait et l'efficacité de certains des nouveaux outils permet désormais d'obtenir des informations interprétables avec une fiabilité, une précision et un gain plus grands. Mais nombre de ces moyens sont utilisés sur des territoires bien connus dans le détail, aisément accessibles, géographiquement proches des laboratoires : secteurs quasi ponctuels des régions tempérées américaines et européennes, le plus souvent. En outre, les traitements numériques d'image ne permettent de traiter qu'un nombre limité de pixels en même temps, c'est à dire de n'aborder que de très petites surfaces de terrain à la fois (avec les données Landsat ou celles du futur Spot) ou avec des résolutions médiocres (type Météosat) ; les « inventaires géographiques » sur de grandes surfaces aux échelles moyennes et petites restent aisément praticables avec les données photographiques seulement.

Mais inversement, certains aspects de la télédétection ont souffert de handicaps. L'application au monde intertropical de ses méthodes et de ses techniques à l'investigation de type géographique (la réponse à la question « où est quoi ? ») a été abordée avec beaucoup de prudence par les thématiciens : géographes, pédologues, botanistes ... Il faut dire que l'apparition des premières données spatiales pour l'observation de la Terre (les données des satellites Landsat 1 puis Landsat 2) avaient suscité beaucoup d'espoirs de leur part, aussi bien que de la part des planificateurs, aménageurs, preneurs de décision, confrontés aux difficiles problèmes du développement dans les pays pauvres et à la nécessité de disposer, sur de vastes territoires, d'une information qui soit à la fois diversifiée, exacte, précise, homogène, à jour. On sait qu'il n'a fallu que quelques années pour que, dans la deuxième moitié des années 70, l'enthousiasme fasse place à un intérêt distant

pour cette source d'information sans doute abondante et riche, mais si peu accessible, si difficile à déchiffrer et à valider. Les travaux se sont donc souvent tournés, comme dans les pays favorisés, vers la résolution de problèmes ponctuels sur des territoires bien connus et d'extension restreinte, avec des résultats instantanément vérifiables ; mieux même, de nombreux travaux se sont attachés à retrouver, sur les données spatiales, des éléments déjà connus et localisés par ailleurs : ces travaux ont l'avantage de fournir des points d'appui assurés sur des thèmes bien identifiés, mais leurs résultats s'avèrent difficilement généralisables dans certains milieux insuffisamment connus, justement, les milieux à tendance sèche et sub-arides, notamment.

Renversant cette tendance et bénéficiant de l'expérience acquise grâce aux hésitations antérieures, notre propos a été précisément de poursuivre une réflexion sur les modes d'acquisition d'informations sur les territoires de vaste étendue, peu ou mal connus en utilisant, dans un premier temps, les moyens les plus simples et, dans un second temps en testant l'efficacité de moyens plus sophistiqués. Il n'était guère praticable d'appliquer aux pays de la zone tropicale les méthodes utiles en pays tempérés, aux pays peu pourvus en documentation de base, les procédures testées dans les pays largement développés. Dans les premiers, qui sont ceux qui nous intéressent, les facteurs et les effets des dynamiques naturelles et humaines sont loin d'être bien connus, dans l'espace non plus que dans le temps, aux échelles régionales notamment, et les données très détaillées et très utiles de la télédétection aérienne (les photographies aériennes) sont peu abondantes, souvent anciennes ; celles des satellites d'observation de la Terre sont, elles aussi, fort peu nombreuses, leur répétitivité théorique n'étant pas assurée dans la réalité.

C'est ainsi que, soucieux de prudence méthodologique et désireux d'aborder l'utilisation de la télédétection spatiale sous un angle pratique, nous avons suivi une démarche qui va du général au particulier en partant de la scène Landsat entière (sous forme photographique), peu détaillée certes au niveau local, mais qui couvre de vastes surfaces de territoire de façon homogène et introduit à une « vision régionale directe ». Puis nous avons recherché, auprès de données et de traitements fournissant une meilleure image (images numériques, données à résolution élevée de la simulation Spot, photographies aériennes et, bien entendu, terrain) des détails locaux éclairants pour l'identification, à échelle régionale, des rapports entre les unités des paysages sahéliens et les « zones » des images spatiales. Dans ces traitements, il était indispensable d'exclure les sélections d'information dirigistes et précoces : en territoire peu ou mal connu, toutes les informations sont, a priori, également importantes ; cette orientation a suscité des réflexions et des tests méthodologiques qui ont été appliqués par la suite et dont les résultats seront présentés dans d'autres documents.

Au moment où ces pages sont mises sous presse, la télédétection spatiale est entrée dans une seconde « ère ». Les capteurs dits « de deuxième génération » sont opérationnels : les satellites Landsat 4 et 5 (lancés en juillet 1982 et en mars 1984), équipés des capteurs Thematic Mapper (résolution 30 mètres, 7 bandes spectrales) transmettent régulièrement des données sur l'Amérique du Nord et l'Europe et dans un avenir très proche (à partir de juillet 1985) les satellites-relais permettront d'obtenir plus couramment des données sur les espaces africains, sud-américains, sud-asiatiques ; le satellite Spot (résolutions au sol 10 et 20 mètres, trois bandes spectrales, répétitivité élevée et stéréoscopie possible) sera opérationnel à la fin de 1985. En même temps, l'observation de la Terre par capteurs satellisés est entrée (janvier 1985) dans le domaine commercial, et non plus expérimental qu'il était auparavant ; ce changement peut être riche (ou lourd ?) de conséquences : la disponibilité des données est en principe mieux assurée mais leur acquisition devient très coûteuse ; les enjeux économiques et financiers risquent d'accentuer la distance entre l'accès à la télédétection spatiale dans les pays riches et l'accès à la télédétection spatiale dans les pays pauvres et risquent d'écarter les thématiciens, chercheurs, décideurs et autres utilisateurs directs de ces pays, d'une maîtrise utile, sinon indispensable. Enfin, la télédétection spatiale dispose désormais, dans de nombreux laboratoires spécialisés, de moyens puissants, souvent mis au point, d'ailleurs, pour d'autres usages et par d'autres disciplines que celles liées à la connaissance de la Terre. Parmi ces moyens, certains devraient permettre de mieux résoudre les problèmes que pose l'inventaire géographique de territoires de vaste étendue insuffisamment connus : les classifications non supervisées de type bayésien, la recherche des formes et des structures par traitements statistiques du signal radiométrique, les applications de la

morphologie mathématique fournissent des classements, des mesures, des images nouvelles, des limites de fiabilité. Ces traitements peuvent être appliqués à de grands nombres de pixels et leurs résultats peuvent être extrapolés avec efficacité. Les traitements photo-chimiques ont aussi fait des progrès : aux classiques procédures diazoïques que nous avons utilisées et exploitées ici, s'ajoutent des techniques de restitution couleur telles que les procédés de type Copycolor (AGFA, par exemple) qui permettent d'obtenir, à partir des mêmes négatifs, des compositions colorées plus fines et plus détaillées.

Avec les moyens qui sont désormais à notre disposition, une partie des études géographiques que nous avons faites sur données photographiques peut-être envisagée avec les données numériques. Mais au fur et à mesure que s'affinent les travaux relatifs aux classements radiométriques multispectraux et aux traitements d'images, on s'aperçoit que le recours à la dimension globale, avant toute analyse et avant tout choix restrictif, est indispensable. Quelles que soient les procédures ultérieures, et tout particulièrement si elles sont fines et spécialisées, le recours à l'image non classée de la totalité du territoire et de ses voisinages reste indispensable même si cette image est incomplète radiométriquement et grossière géographiquement.

INTRODUCTION

Recherche dans la recherche, notre propos est de présenter comme centre d'intérêt *une étude géographique régionale* et non pas *la région* dans laquelle elle s'est déroulée. Intérêt méthodologique donc, de la description d'une opération réelle et des réflexions qu'elle suscite sur ses méthodes, ses résultats, sa critique.

Ce ne sont pas *les pays de l'Azawagh* que nous allons analyser ci-dessous, c'est la façon dont nous nous sommes servis de la télédétection spatiale pour *étudier* les pays de l'Azawagh.

On ne trouvera donc pas dans les chapitres qui suivent les articulations régionales, les caractères spécifiques ni les originalités profondes de pays au demeurant variés, malgré leur fausse réputation de monotonie ; mais nous souhaitons que soit perçue à travers la description de l'utilisation que nous avons faite des données de télédétection spatiale, une approche nouvelle de l'*espace géographique,* du *terrain* et du *territoire.*

Le périmètre étudié au moyen des données de télédétection spatiale, Landsat notamment, encadre une surface de 200 000 kilomètres carrés environ entre le 12° et le 18° parallèle Nord, entre le 2° et le 8° méridien Est.

Géographiquement, ce périmètre est axé sur la vallée de l'Azawagh, affluent fossile du fleuve Niger. Le haut bassin de l'Azawagh concerne les massifs sahariens de l'Aïr, de l'Ahaggar et de l'Adrar des Ifoghas. En amont de la zone de confluence d'In Abangharit, les deux branches principales portent le nom de Timmersoï et d'Eghazer wan Agadez : c'est leur réunion qui constitue l'Azawagh proprement dit, au sens hydrographique. A partir de la région de Tigezefen et d'Abala, sur la frontière nigéro-malienne, l'Azawagh prend le nom de *Dallol Boso* jusqu'à sa jonction avec le fleuve Niger.

On associe souvent au Dallol Boso, sur le plan géographique et sur le plan administratif, l'autre grande vallée fossile tributaire du Niger, le Dallol Mawri qui n'appartient pas au système hydrographique de l'Azawagh à proprement parler, mais qui présente des caractères apparents assez proches ; ces deux grandes vallées, leurs affluents et les plateaux intermédiaires sont souvent globalement désignés, au sud du 14° parallèle, sous le nom indifférencié de « la région des dallols ».

Le périmètre que nous nous sommes assigné, fondé sur les axes hydrographiques, inclut donc les systèmes suivants :

- la vallée de l'Azawagh proprement dit et ses bordures, y compris ses courts affluents de rive gauche ;
- en amont, son grand affluent l'Eghazer wan Agadez ;
- en aval, le système des deux dallols.

Cette définition relativement simple recouvre en fait une réelle complexité terminologique et toponymique.

Le terme d'origine tamasheq, *Azawagh* est devenu d'usage courant parmi les populations de langage différent qui se trouvent devant la nécessité de désigner la vallée et ses bordures, mais il désigne souvent un ensemble plus vaste : pour les sédentaires Zarma et Hausa et pour les Peuls, sédentaires et nomades, l'Azawagh c'est le septentrion, toute la région située au nord du 15° parallèle, vaste territoire presque plat, sableux et herbeux qui s'étend entre le massif de l'Aïr, celui de l'Adrar des Ifoghas et les contreforts méridionaux de l'Ahaggar, dont la partie nord porte le nom de Tamesna. Cette nomenclature est celle qui figure sur la plupart des cartes officielles.

Figure 1 - Europe - Afrique

Dans la partie méridionale de la vallée proprement dite et à partir des latitudes « sédentaires », les toponymes se différencient : la grande vallée est nommée Dallol Boso (*dallol* = vallée) par les Peuls, Boboye par les Zarma ; les plateaux de rive droite et de rive gauche sont respectivement nommés par les Zarma Fakara et Zigi, et le nord de la région de Dogondoutchi porte le nom hausa d'Arewa.

A l'autre bout du système, le terme *Eghazer wan Agadez* (la *vallée* d'Agadez) s'applique au tronçon principal drainant la plaine du même nom, mais seulement dans la plaine ; il ne passe d'ailleurs pas à proximité de la ville d'Agadez, « arrosée » (inondée serait un terme plus juste), elle, par le Telwa...

Il est utile de noter ici que les cours d'eau (tous temporaires) et les vallées ne sont pas perçus par les populations locales comme des linéarités continues, au moins dans la toponymie : ils portent, sur des tronçons très courts (quelques kilomètres), des noms qui font référence à des particularités locales (un arbre, une colline) ou sont désignés par les noms des puits proches. Les cartes actuelles présentent un compromis entre les toponymies purement locales, citées par des informateurs compétents, habitants des lieux, et des simplifications plus pratiques issues de documents coloniaux...

Pour la commodité de l'exposé, nous désignerons sous le nom de *les pays de l'Azawagh et des dallols* ou *les régions de l'Azawagh et des dallols* l'ensemble du périmètre étudié, comprenant :

- le bassin de l'Eghazer wan Agadez,
- la vallée de l'Azawagh et ses bordures,
- les deux dallols et les plateaux intermédiaires.

Chaque fois que cela a paru nécessaire, nous avons précisé les éléments constitutifs de cet ensemble : *bassin* ou *plaine de l'Eghazer wan Agadez* désigne l'aire comprise entre la falaise de Tigidit et les plaines ensablées du nord de Sekiret, entre le massif de l'Aïr et l'aire de confluences d'In Abangharit ; *vallée de l'Azawagh* ou *système de l'Azawagh* désigne la vallée de l'Azawagh entre In Abangharit et la frontière de la région de Tigezefen et ses bordures : rive droite et affluents de rive gauche tels que le Tadist, l'Azar, etc. *Les dallols* désigne le Dallol Boso et ses bordures (Fakara et Zigi) entre Tigezefen et le confluent avec le Niger, le Dallol Mawri moyen et inférieur, ses affluents et les plateaux de bordure y compris, au nord, l'Arewa.

Notre étude laisse cependant de côté deux territoires qui, géographiquement, s'y rattachent :

— à l'ouest, la grande vallée de l'Azagaret ou Zgaret, essentiellement malienne, est trop occidentale par rapport aux centres d'intérêt archéologique planifiés par la République du Niger et aux possibilités administratives et logistiques d'investigation ; son cours inférieur est inclus dans les scènes Landsat étudiées mais la région drainée n'a pas été examinée en détail ;

— à l'est, les pays de l'Ader ou Ader Doutchi, plateaux caillouteux coupés de profondes vallées, sont étudiés dans le cadre de problématiques différentes : nous les avons laissés (provisoirement ?) de côté.

Le périmètre sélectionné permet de travailler sur des « pays » géographiquement différents (par leurs caractères hydrographiques et géomorphologiques) qui sont situés sur la même zone de latitude : ce sont les aires qui s'étendent d'est en ouest depuis la bordure de l'Aïr jusqu'à la rive droite de l'Azawagh ; d'autre part, il permet de travailler sur des « pays » géographiquement homogènes (par l'axe hydrographique et les couvertures sableuses) mais différenciés par une évolution climatique, une occupation humaine et des contrastes zonaux très marqués : ce sont les pays de la vallée de l'Azawagh puis des dallols, depuis In Abangharit jusqu'au fleuve Niger.

Le périmètre a été choisi en fonction de ces caractères mais tout autant en fonction des critères archéologiques qui les rejoignent, tant les relations homme/milieu sont à l'évidence inséparables, dans le présent et dans le passé.

En effet, la recherche géographique sur les pays de l'Azawagh a pour origine l'intérêt suscité depuis plusieurs années — depuis plusieurs dizaines d'années quelquefois — par la découverte d'indices et de vestiges importants de peuplements aujourd'hui disparus, par la vivacité des traditions orales témoignant d'un passé mouvementé, par l'existence et l'évolution de cultures résiduelles et de genres de vie spécifiques.

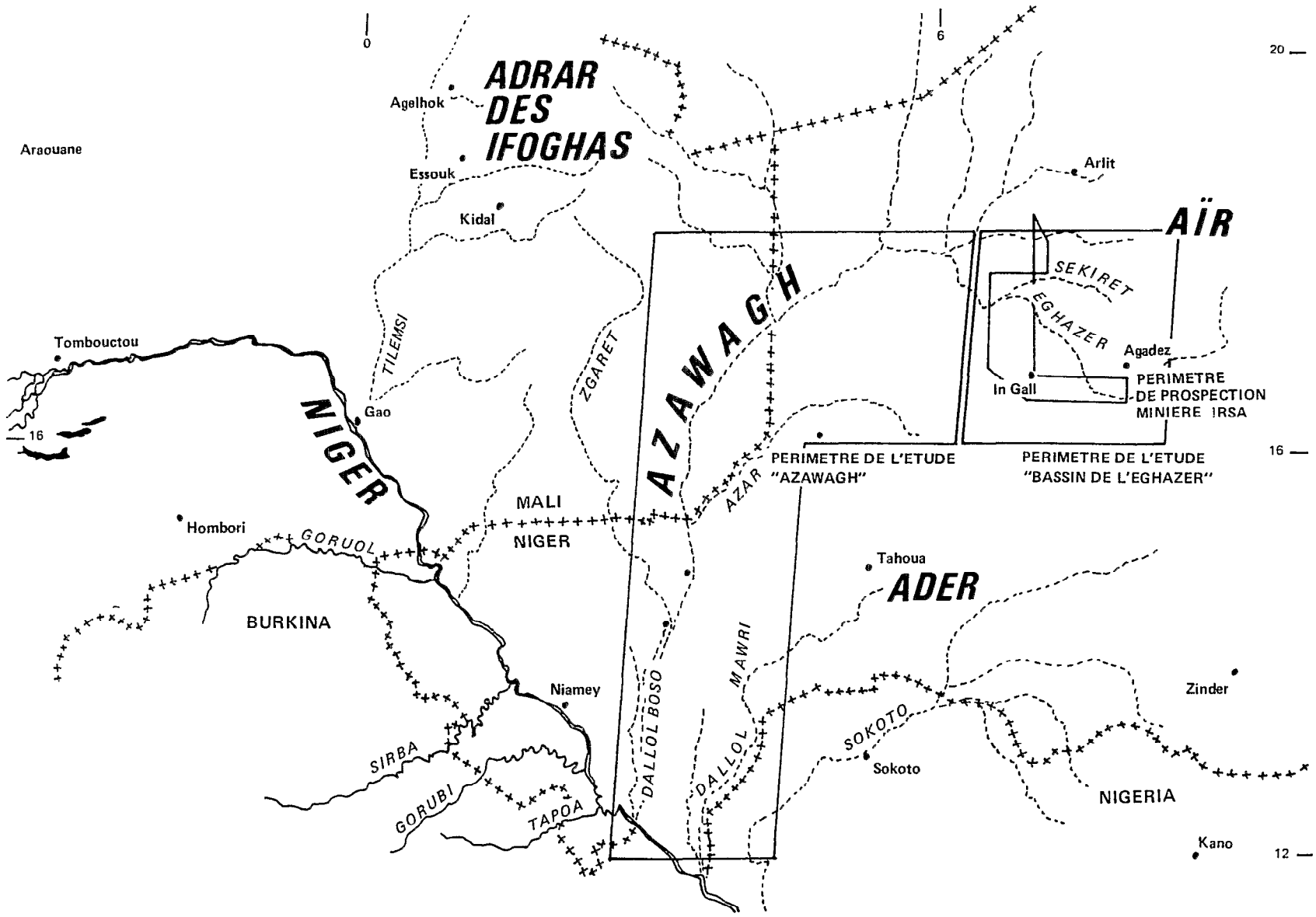


Figure 2 - Les périmètres étudiés

Lorsqu'ont été envisagés, vers 1970, des travaux d'anthropologie dans la région d'Agadez, la notion de recherche pluridisciplinaire faisait déjà son chemin dans les milieux scientifiques. L'existence même de la formation de recherche qui fut à l'origine des projets et mena à bien les travaux, la RCP 322 du CNRS (1), témoignait de la part de ses fondateurs d'une volonté très forte d'associer autour de problèmes scientifiques communs anthropologues, archéologues, géographes, linguistes, historiens... L'archéologie n'était pas encore l'élément moteur de cette association : elle n'est intervenue d'abord que pour apporter sa contribution à la connaissance du passé que l'histoire écrite ou parlée laissait dans l'ombre. En 1974, la perspective d'une exploitation minière dans la région d'In Gall — Tegidda n Tesemt (dans la plaine de l'Eghazer wan Agadez) a paru présenter des risques très sérieux de destruction des vestiges archéologiques dont on commençait seulement à entrevoir la richesse et l'abondance, en particulier pour la période préhistorique.

Les chercheurs de l'équipe se sont alors mobilisés pour donner priorité à la recherche archéologique et chaque discipline a mis à la disposition de l'ensemble ses compétences, ses outils, ses méthodes, ses orientations... Le résultat de cette démarche commune est exposé dans les volumes qui constituent le *Rapport Final du Programme Archéologique d'Urgence, région d'In Gall - Teggidda n Tesemt* en cours de publication, qui contiennent entre autres une partie des résultats thématiques obtenus au cours des travaux de télédétection spatiale sur le bassin de l'Eghazer wan Agadez et les résultats cartographiques correspondants.

Mais notre ambition a été de dépasser la simple pluridisciplinarité ; derrière la juxtaposition des spécialités qu'implique ce vocable se profile en effet une autre réalité scientifique : les missions communes et les discussions constantes sur le terrain ont amené les uns et les autres à soulever des questions et à apporter des éléments de réponse qui débordaient parfois le domaine de leur discipline *stricto sensu,* tandis que le recours aux informateurs locaux restituait l'unité que constitue le rapport de l'homme à son territoire.

Les chercheurs ont ainsi mis en corrélation les modes de peuplement actuels et les traces des peuplements anciens et de leurs activités (pêche, chasse, agriculture, élevage, métallurgie) avec les milieux naturels correspondants (ou ayant correspondu) à ces activités et à ces modes de vie. Les éléments de ces milieux naturels, quand ils ont été mieux connus, ont éclairé des hypothèses de travail, donné des orientations de recherche et même fourni des indications directes pour la prospection archéologique systématique et les datations relatives.

Avec l'aide des géographes, l'équipe a formulé des hypothèses sur les relations entre la continuité du peuplement, les activités spécifiques et les caractères particuliers du milieu naturel dans les plaines de l'Eghazer wan Agadez.

Dans le programme de travail du Programme Archéologique d'Urgence, la part de la discipline *géographie* a été importante. Elle s'est organisée en trois orientations :

— l'aide à la prospection archéologique,

— l'étude de la répartition, des activités et des comportements économiques et sociaux des populations actuelles,

— l'étude des milieux naturels actuels et des milieux naturels plus anciens (dont les premiers sont hérités) qui ont abrité un habitat sédentaire dans les régions actuellement arides et semi-arides.

Ces orientations sont mutuellement complémentaires et complémentaires de la recherche archéologique dont elles ont subi les contraintes et suivi les objectifs :

— couvrir la totalité du territoire concerné par les recherches pluridisciplinaires, notamment le périmètre du Programme Archéologique d'Urgence et ses bordures,

— être suffisamment complètes et exhaustives pour que les résultats soient cartographiables et exploitables systématiquement,

---

(1) Dont l'intitulé est le suivant : *Civilisations et environnements sahélo-soudaniens du Pléistocène à l'époque actuelle.*

— être suffisamment fines pour correspondre aux critères géographiques de la prospection archéologique, qui sont d'ordre ponctuel.

Il s'agissait donc principalement de compléter les études de terrain, voire de les précéder, en fournissant des informations classées et homogènes sur tout le territoire.

C'est en 1977 que nous avons commencé à utiliser systématiquement les images du satellite d'observation de la terre Landsat sur la région d'Agadez et le massif de l'Aïr dans le cadre d'une opération précise.

Les données Landsat avaient l'avantage de présenter les régions à étudier dans leur ensemble. Elles avaient en outre l'avantage de pouvoir être consultées sous diverses formes : tirages photographiques noir et blanc, tirages en couleurs sélectionnées, visualisations et traçages issus des traitements numériques et sous diverses échelles, de 1/1 000 000 à 1/10 000.

Les données spatiales nous ont fourni à la fois des repères topographiques fiables au cours des travaux sur le terrain dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez et la possibilité d'envisager l'extension géographique des thèmes intéressant notre recherche ; elles ont permis, enfin, la « découverte » de thèmes et de nuances non soupçonnés sur le terrain.

Au fur et à mesure de l'avancement des travaux collectifs les résultats (partiels d'abord puis de plus en plus cohérents) ont donné lieu entre archéologues, anthropologues et géographes, à discussions, hypothèses, amorces de vérification ... Il est alors devenu tentant de chercher la confirmation des hypothèses scientifiques et de la validité des méthodes de travail non plus directement dans la région d'Agadez (c'est-à-dire dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez) mais comparativement dans ses périphéries, dans les régions *voisines*.

En effet, l'une des plus prometteuses hypothèses de travail, issue de la synthèse archéologie—géographie—paléo—géographie est que le bassin de l'Eghazer wan Agadez a représenté dans le passé une *région* très favorable au peuplement, à la diversité et à la continuité des occupations et des activités humaines : grâce à des capacités hydrologiques variées (grandes rivières issues de l'Aïr montagneux, alluvions sableuses et argileuses), aux gisements métallifères et salifères de surface, à des positions topographiques favorables (dunes, talus et terrasses au-dessus des aires inondables), le milieu naturel aurait permis la fixation de populations certainement nombreuses, pratiquant des activités variées allant de la cueillette-pêche-chasse-élevage (attestés dès le troisième millénaire avant le présent) à la métallurgie du cuivre et du fer en passant par l'agriculture et aboutissant à une organisation de type étatique (1).

Il devint évidemment passionnant de rechercher si ces caractères remarquables et présumés exceptionnels pouvaient être rencontrés dans les milieux voisins et partiellement différents, géographiquement proches, que sont la Tadarast, le Tamesna ou l'Azawagh. Une telle préoccupation s'intégrait parfaitement aux programmes de prospection archéologique et de relevé des traditions orales historiques de la République du Niger et de la République du Mali.

Un nouveau programme a ainsi été dressé, qui consistait à expérimenter et à valider les hypothèses de travail et les méthodes. Il a été fixé, sur le plan géographique, en suivant le grand axe hydrographique de l'Azawagh qui prolonge l'Eghazer wan Agadez vers l'aval et vers l'ouest.

Cette opération nouvelle impliquait de travailler sur des territoires plus étendus (mais présumés plus homogènes) et plus difficilement parcourables que ne l'était la région de l'Eghazer wan Agadez (2). Une préparation géographique soigneuse était donc nécessaire : vérification de la validité des cartes topogra-

(1) La *Takedda* d'Ibn Battuta, vraisemblablement localisée à Azelik, détruite aux environs du XVe siècle par sa rivale Agadez après une guerre que la tradition orale décrit comme longue et acharnée.

(2) Dans l'étude du bassin de l'Eghazer wan Agadez, Agadez, la capitale régionale (25 000 habitants) et base logistique pourtant excentrée, ne se trouvait jamais à plus de 200 kilomètres, c'est-à-dire une journée d'automobile, des secteurs de travail extrêmes. Les pays de l'Azawagh au contraire sont absolument dépourvus de villes, de voies de communication et de dépôts permanents de carburant ; de surcroît, ils sont coupés en deux (et même en trois) par une frontière au tracé plus ou moins contesté...

phiques existantes, identification, localisation, extension des thèmes intéressant la recherche archéologique, paléogéographique et géographique et préparation des travaux sur le terrain.

L'étude préalable du territoire a été réalisée par interprétation des données Landsat. Elle a donné lieu à une cartographie provisoire *(Carte physiographique des pays de l'Azawagh,* à 1/500 000) que les travaux ultérieurs se chargeront d'exploiter, de compléter, de critiquer.

Cette dualité du travail, sa séparation en deux épisodes chronologiques et méthodologiques — le bassin de l'Eghazer wan Agadez d'une part, l'Azawagh d'autre part — expliquent pourquoi on trouve exposées plus loin deux méthodes de travail différentes, expérimentées dans des conditions différentes et pour répondre à des objectifs différents, sur des aires géographiques voisines : d'une part un travail régional effectué par télédétection spatiale avec une réelle *vérité-terrain* : c'est l'étude du bassin de l'Eghazer ; d'autre part un travail pluri-régional à la même échelle, sur un territoire plus étendu, effectué par télédétection spatiale *sans observations de terrain* pour la plus grande partie : c'est l'étude de l'Azawagh.

A mesure que progressaient les travaux dans toutes les disciplines concernées, sont apparus avec acuité d'une part l'intérêt et la validité des méthodes et d'autre part les lacunes dans certaines phases de la recherche ; c'est ainsi que les géographes ont regretté de n'avoir pu s'adjoindre la collaboration sur le terrain d'un géomorphologue expérimenté : des incertitudes, des confusions, des contresens probables auraient été évités et certaines hypothèses auraient été menées beaucoup plus loin si l'on avait disposé de points d'appui plus fermes en ce qui concerne la genèse, la nature et la chronologie relative des formations de surface ; à l'heure actuelle, les hypothèses fragiles que nous avons formulées restent en suspens et l'éventail des explications et des concordances reste trop ouvert.

De la même manière, la coordination entre les différents épisodes de la recherche géographique n'a pu être entièrement maîtrisée : préparation aux études de terrain, séjours sur place, disponibilité des données spatiales et de la documentation complémentaire se sont succédés dans des ordres variables qui dépendaient davantage de conjonctures administratives et d'échéances budgétaires que de la logique des enchaînements méthodiques... Des hiatus apparaissent donc dans la chaîne des opérations, partant, des incertitudes et des lacunes dans l'interprétation des données.

Néanmoins, les résultats montrent qu'une étude globale de ce type est techniquement et scientifiquement possible malgré les difficultés imposées par les conditions climatiques, l'organisation des missions à longue distance et les compréhensibles et inévitables problèmes soulevés par l'articulation de plusieurs administrations entre elles.

Ce qui constitue l'essentiel des résultats obtenus, ce n'est pas la description archéologique, géographique, historique, linguistique de la région mais les informations fournies par leur association. Ce qui est important, c'est d'insérer la recherche archéologique proprement dite à la fois dans son cadre naturel et dans son cadre humain : même dans ces régions concernées par une évolution du climat très rapide au moins depuis la période post-ogolienne et le début du Néolithique (dixième millénaire environ avant le présent), l'homme vivant n'est pas indépendant des groupes qui l'ont précédé et des traces qu'ils ont laissées ; réciproquement, les marques des occupations successives s'intègrent de façon très précise dans les situations actuelles.

A travers les analyses techniques et méthodologiques qui font l'objet du présent document, nous avons donc tenté de restituer l'image dynamique des régions étudiées et la trace des hommes et des paysages qui ont suscité les recherches initiales.

La première partie de ce volume présente brièvement *la géographie* des territoires concernés, c'est-à-dire des pays de l'Azawagh nigéro-malien. Nous l'avons voulue aussi précise que possible afin que soient compréhensibles les allusions aux caractères du milieu qui sont faites pour la suite, notamment dans la partie thématique.

La seconde partie décrit *les outils* dont nous disposions pour effectuer l'étude d'un vaste espace mal connu et peu décrit et la façon dont nous nous sommes servi des plus efficaces d'entre eux : les données de

la télédétection spatiale. Cet usage, nous l'avons voulu simple et reproductible : plutôt que traiter l'information spatiale sous forme mathématique nous l'avons traitée sous forme visuelle, au moyen des images photographiques. Deux types d'utilisation sont décrits : l'étude détaillée, étayée par des travaux sur le terrain d'une seule scène Landsat, du bassin de l'Eghazer wan Agadez ; l'étude plus superficielle, sur neuf scènes Landsat, des pays de l'Azawagh du centre et du sud sans étude de terrain. L'examen des données Météosat et d'un enregistrement de simulation du satellite Spot complète ces sources.

La troisième partie aborde les aspects plus précisément *thématiques* de notre recherche en présentant, pour quatre familles de thèmes, les rapports entre la figuration sur image Landsat et ce qu'on peut connaître du paysage par les photographies aériennes : les constantes, les variantes, éventuellement les anomalies et leurs tentatives d'explication. L'analyse est menée au moyen d'un grand nombre d'exemples détaillés accompagnés d'illustrations, qui mettent en évidence la variété des milieux et des unités de paysages.

La quatrième et dernière partie dresse en conclusion le *bilan* des opérations de télédétection dans les pays de l'Azawagh en abordant l'apport des données spatiales aux sources d'information dites « classiques » et l'intérêt des diverses données Landsat, Météosat et Spot.

Transcription des noms de lieux

Le problème de la transcription correcte des noms de lieux sur les documents géographiques et cartographiques n'a été résolu de manière satisfaisante et unifiée ni par les linguistes, ni par les anthropologues, ni par les géographes, ni par les cartographes.

Les règles de transcription habituellement pratiquées dans les ouvrages africanistes présentent, pour le cartographe et pour le lecteur non spécialisé, le défaut de faire appel à des signes diacritiques gênants dans le graphisme des cartes et d'être trop éloignées de la transcription courante ou administrative à laquelle les utilisateurs des cartes et familiers de ces lieux sont désormais habitués.

Le nom de lieu, dès lors qu'il désigne tel endroit particulier pour éviter précisément la confusion avec son voisinage, évolue dans la langue comme un nom propre et non plus comme le substantif générique qu'il était souvent à l'origine, au même titre que les noms de personne. Il se modifie alors au gré des usages et des transcriptions jusqu'à ce qu'une formulation officielle le fige, sous une forme identifiable ou non.

Outre le fait qu'il est difficile de transcrire de façon précise un nom vernaculaire, il est souvent difficile d'en connaître la transcription exacte : la prononciation des informateurs est variable et la transcription hésite entre plusieurs versions... Ces difficultés font que nous nous sommes attachés à une transcription des noms de lieux aussi fidèle mais aussi simple que possible sans chercher une rigueur peu réalisable.

Cependant, les transcriptions coloniales puis l'usage administratif ont donné à un certain nombre de localités des noms et une orthographe quelquefois peu en rapport avec la prononciation locale ou la simplicité. Nous avons respecté ces transcriptions devenues officielles : *Filingué, Tahoua, Dosso, Tchin Tabaraden*, etc.

Dans un cas particulier, nous avons préféré la transcription francisée, plus simple et désormais passée dans l'usage, à la transcription correcte : il s'agit du mot *adrar (adghadgh)*, présent dans de nombreuses toponymies (Tegidda n Adrar, Adrar des Ifoghas...).

Voici les conventions que nous avons adoptées :

ch : tch comme l'anglais *chair*
g : toujours dur comme dans *gare*
s : toujours sifflant comme dans *serpent*
gh : r grasseyé (fricative sonore) de *Paris*
r : r roulé
kh : comme l'allemand *achtung*

q : qaf arabe (occlusive vélaire)
sh : ch de *chameau*
u : ou de *souris*
w : diphtongue comme *ouate*

Les consonnes accentuées sont marquées par un redoublement mais les voyelles longues ne sont pas différenciées des voyelles brèves.

Dans le courant du texte, un certain nombre de mots vernaculaires sont utilisés, soit parce qu'ils représentent une réalité sans équivalent en français, soit parce qu'ils sont fréquents dans la toponymie. En voici la signification et la langue d'origine :

agoras : forêt, aire couverte de végétation arborée dense (Tamasheq).
dallol : grande vallée, grande vallée fossile (Dallol Boso et Dallol Mawri) (Peul).
egef : dune (Tamasheq)
eghazer : vallée, grande vallée (Tamasheq).
kori : petite vallée, vallée, oued (la vallée et l'écoulement) (Hausa), utilisé dans ce sens dans toutes les langues du Niger.
Tamasheq : la langue des populations touarègues.

Les mots *touareg* et *peul* sont des mots français, qui prennent la marque du féminin et du pluriel comme les mots français, en e et s. Les autres désignations de populations (hausa, zarma...) sont orthographiées de façon invariable.

Première partie

PRÉSENTATION GÉOGRAPHIQUE

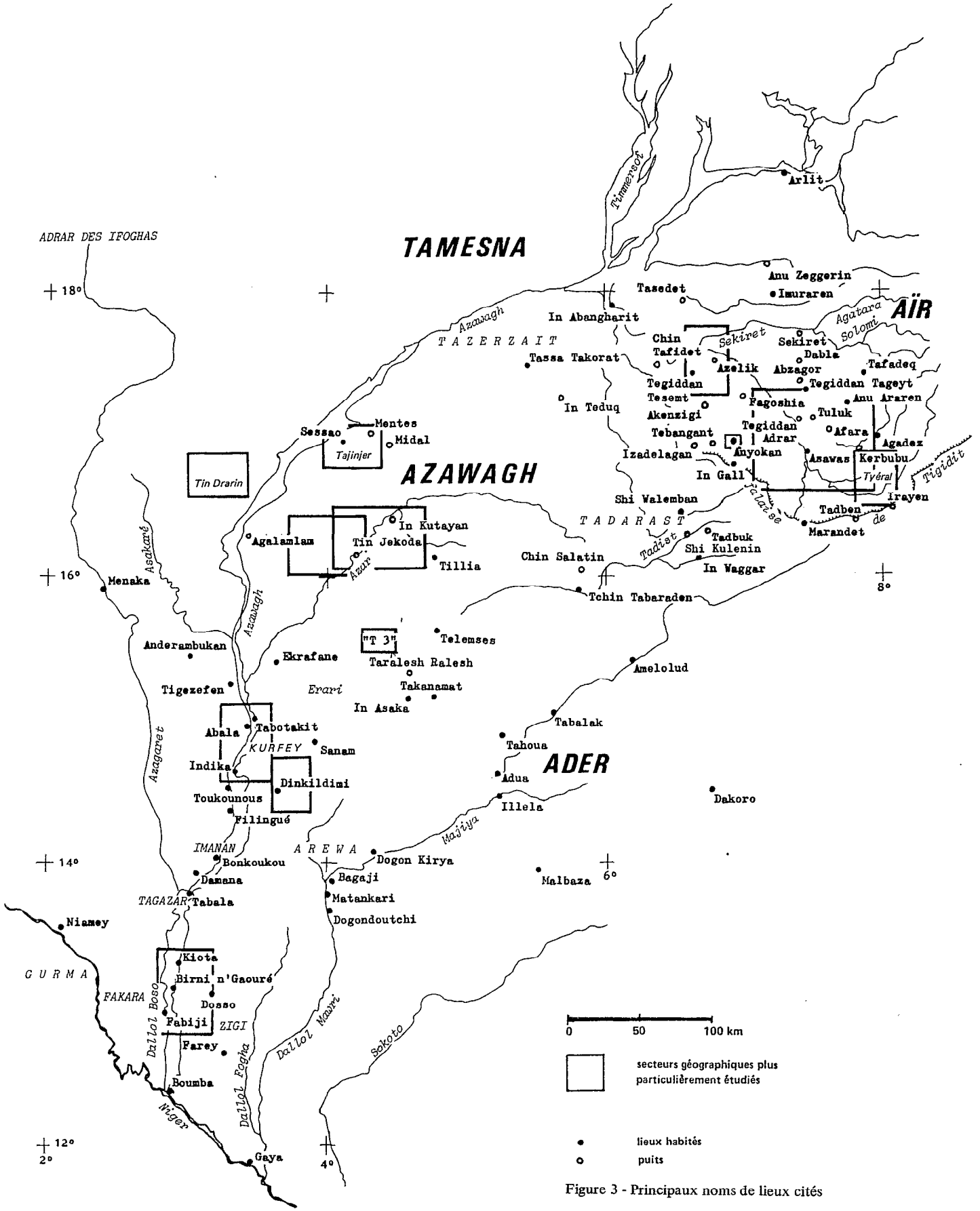


Figure 3 - Principaux noms de lieux cités

Les pays de l'Azawagh ont été décrits, dans leurs aspects généraux et dans leurs aspects particuliers les plus contraignants (le climat notamment) dans des ouvrages géographiques consacrés à tout ou partie de l'Ouest nigérien. Les études de E. Bernus sur les Touaregs du Niger (Bernus, 1981) et celles de A. Beauvilain sur le Dallol Boso (Beauvilain, 1977) font une large place à la description du milieu naturel et à l'analyse de ses composantes. Nous ne récrirons donc pas ce qui a été exposé mieux et de façon plus détaillée avant nous : le présent document étant consacré à l'utilisation des données de télédétection spatiale, son intérêt est d'être illustré avec abondance de documents graphiques ; il nous paraît plus lisible et plus concis de présenter les grandes lignes géographiques de la région sous forme de cartes accompagnées de brefs commentaires. Il convient cependant de ne pas faire l'économie d'une certaine précision faute de laquelle les descriptions méthodologiques et les analyses thématiques qui suivent paraîtront peu compréhensibles.

Mieux que des exposés rédigés, les cartes permettent de mettre en évidence les transitions et les nuances, l'absence de solution de continuité et d'opposition fondamentale entre les milieux septentrionaux et les milieux méridionaux : l'eau du sous-sol n'est guère moins abondante ni accessible au nord qu'au sud, l'abondance en eaux de surface ne correspond pas nécessairement aux schémas de la latitude, pasteurs nomades et cultivateurs sédentaires se mêlent sur les mêmes espaces, la végétation spontanée est dégradée partout...

1. LE CLIMAT

Les pays de l'Azawagh sont situés entre le 18e parallèle au nord et le 12e parallèle au sud : ils sont concernés par la *zone aride* (moins de 100 mm de pluie), par la *zone sahélienne* (de 100 ou 150 à 600 mm) et par la *zone sahélo-soudanienne* (700 à 800 mm de pluie par an en moyenne).

Pour simplifier, disons que cette « grande région » présente toutes les transitions du climat sahélien, depuis la nuance saharienne jusqu'à la nuance soudanienne. Les pluies sont des pluies d'été, elles commencent en avril-mai dans le sud et durent 4 à 5 mois, elles commencent en juillet dans le nord et durent deux à trois mois.

La figure 4 présente les chiffres calculés des stations météorologiques de la région : moyenne en millimètres et nombre d'années d'observation, écart-type et coefficient de variation des principales stations. On remarque le très petit nombre d'observations pour les stations les plus septentrionales : la plupart d'entre elles n'existent que depuis quelques années seulement ou sont irrégulièrement entretenues.

La principale caractéristique du climat sahélien est son extrême irrégularité dans le temps et l'espace : les dates de la première et de la dernière pluie, les quantités tombées dans l'intervalle sont très variables d'une année à l'autre. Cette variabilité est accentuée au nord, elle s'atténue au sud et tend à disparaître à l'extrémité méridionale du Dallol Mawri où l'on touche le domaine soudanien. On verra qu'elle doit être prise en compte dans l'interprétation des données de télédétection spatiale.

En début et en fin de saison des pluies au sud et pendant toute la saison au nord, les pluies tombent sous la forme d'averses violentes, souvent très localisées et des points très proches peuvent ne pas bénéficier

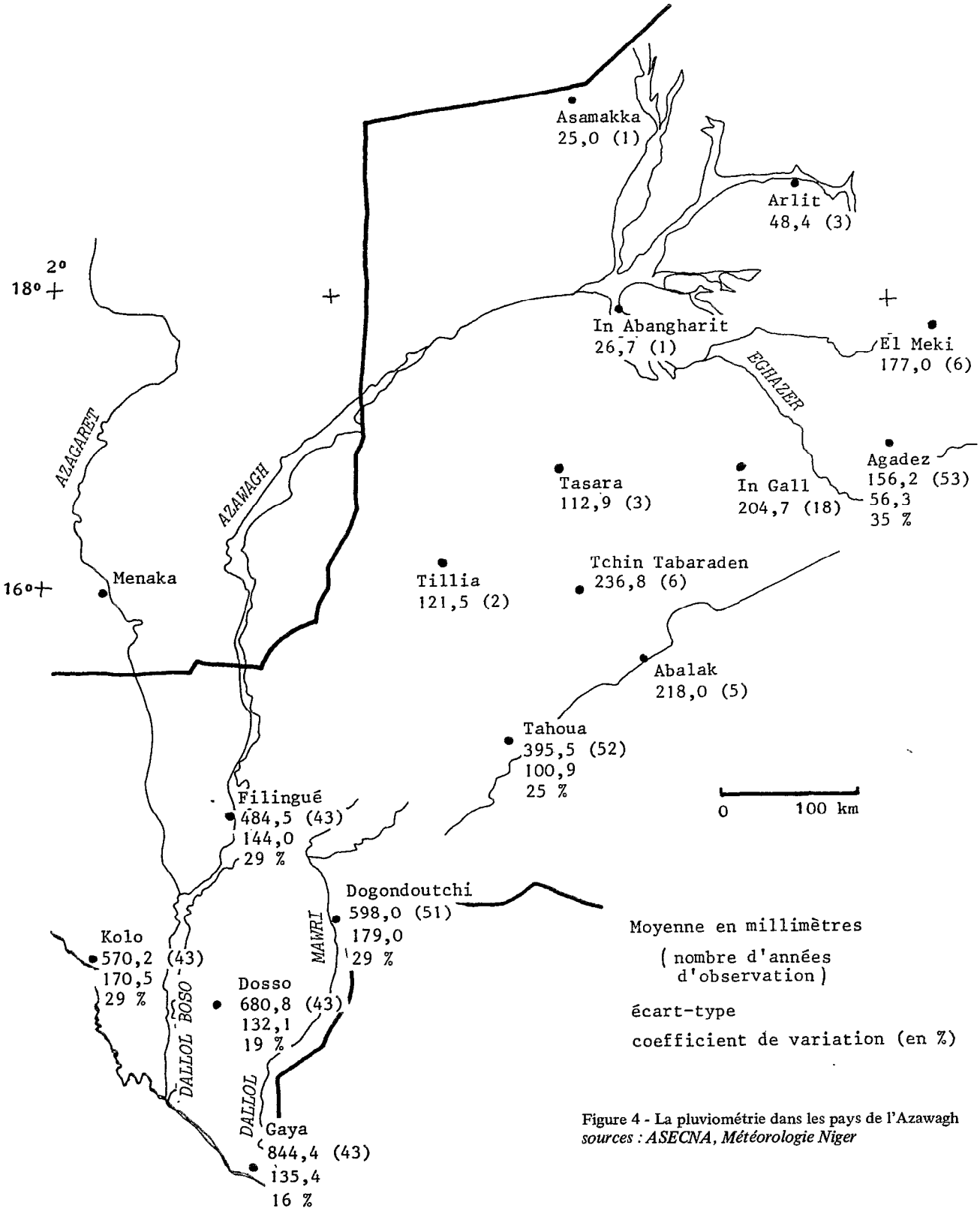


Figure 4 - La pluviométrie dans les pays de l'Azawagh
sources : ASECNA, Météorologie Niger

des mêmes quantités. Ces pluies sont très agressives, surtout en début de saison où les averses s'abattent sur des sols secs et souvent dénudés : la violence d'impact des gouttes détruit la cohésion des éléments de surface, les plus fins sont entraînés dans des écoulements en nappe dont les filets finissent par se réunir en ruisseaux copieux à pouvoir érosif élevé.

1952 est la première d'une série d'années régulièrement satisfaisantes sur le plan pluviométrique, pendant 10 ans environ. C'est la « décennie pluvieuse » qui a duré jusqu'en 1963 ou 1965. Cette période favorable a entraîné vers le nord la progression d'un front pionnier agricole qui a entraîné lui-même la création d'une « limite légale des cultures sédentaires » obligeant les cultivateurs à respecter les terrains pastoraux. Cette réglementation n'a jamais été réellement appliquée semble-t-il. Une vive impulsion a été donnée au développement de l'élevage pastoral dans la partie non cultivable du territoire nigérien, matérialisée par des aménagements hydrauliques pour l'abreuvement des troupeaux.

La fin de la décennie humide a été brutalement marquée par une première sécheresse (1967-68) qui a décimé les troupeaux puis par la sécheresse « planétaire » de 1972-74, qui dure encore au Sahel. Depuis 1975, une pluviométrie irrégulière et médiocre mais généralement considérée comme suffisante par les pasteurs a permis la reconstitution des troupeaux sans pour autant donner aux agriculteurs du sud une sécurité satisfaisante, mais 1984 a connu une pluviométrie très déficitaire surtout dans le nord, entraînant la décimation du bétail et l'exode des populations.

Dans toute la région qui nous intéresse, hommes, bêtes et plantes sont soumis aux seules ressources pluviales pour leur ravitaillement en eau et en produits alimentaires, directement ou indirectement. Mais cultivateurs et éleveurs n'ont pas, à l'égard de leur abondance, les mêmes attitudes ni les mêmes souhaits. Pour l'éleveur, à peu près n'importe quelle pluie est la bienvenue et plus elle est importante mieux elle est accueillie : les mares pleines et les pâturages drus assurent le stationnement prolongé des troupeaux et des hommes dans le nord où les conditions de vie sont alors les meilleures ; une longue saison des pluies permet de se tenir à l'écart des champs pendant toute la saison des cultures. La « pluie des mangues » de janvier-février est aussi bien accueillie : elle intervient — pas tous les ans et pas partout — au milieu de la saison sèche mais les quelques millimètres qu'elle apporte et l'humidité atmosphérique qui l'accompagne favorisent la reprise de la végétation herbacée et arbustive dont les jeunes pousses sont broutées à un moment où l'alimentation du bétail est déjà très maigre. Cependant, des pluies trop précoces en avril ou mai risquent de faire démarrer la végétation herbacée trop vite ; celle-ci monte en graine sans avoir atteint sa taille normale, compromettant la production de fourrage qui aurait dû se développer au milieu de la saison, en août (Bernus, 1974) ; des pluies trop tardives en octobre, surtout après une saison médiocre, sont considérées comme « mauvaises ».

Le cultivateur, lui, souhaite plus précisément que les besoins des plantes cultivées soient satisfaits : la surabondance des pluies n'est pas considérée comme positive, car elle favorise les maladies cryptogamiques et l'érosion des sols et réduit les perspectives de récolte.

La notion même d'*année satisfaisante* doit être nuancée : elle signifie sans aucun doute qu'un *minimum* pluviométrique est dépassé mais il n'est pas aisé de déterminer ce minimum. Selon les espèces cultivées et le calendrier agricole, la nature des sols, la répartition des pluies au cours de la saison, il varie considérablement . La notion de *pluie utile* (Cochemé et Franquin, 1967 ; Gallais, 1967) permet de moduler les chiffres correspondant aux besoins réels des agriculteurs et, dans une certaine mesure, des pasteurs.

Sans entrer dans les détails, disons qu'une *pluie utile* est une pluie de 3 mm minimum suivie à moins de huit jours, d'une pluie égale ou supérieure. En zone agricole, la pluie utile de début de saison qui marque les semailles doit être plus abondante que les suivantes.

On a figuré selon ce critère (figure 5) la répartition des pluies utiles à la station de Filingué prise au cours de trois années différentes.

En 1934, les pluies utiles se réduisent à trois courtes périodes couvrant au total 46 jours ; les deux interruptions (20 jours et 15 jours) sont désastreuses compte-tenu de la faible pluviométrie de la saison.

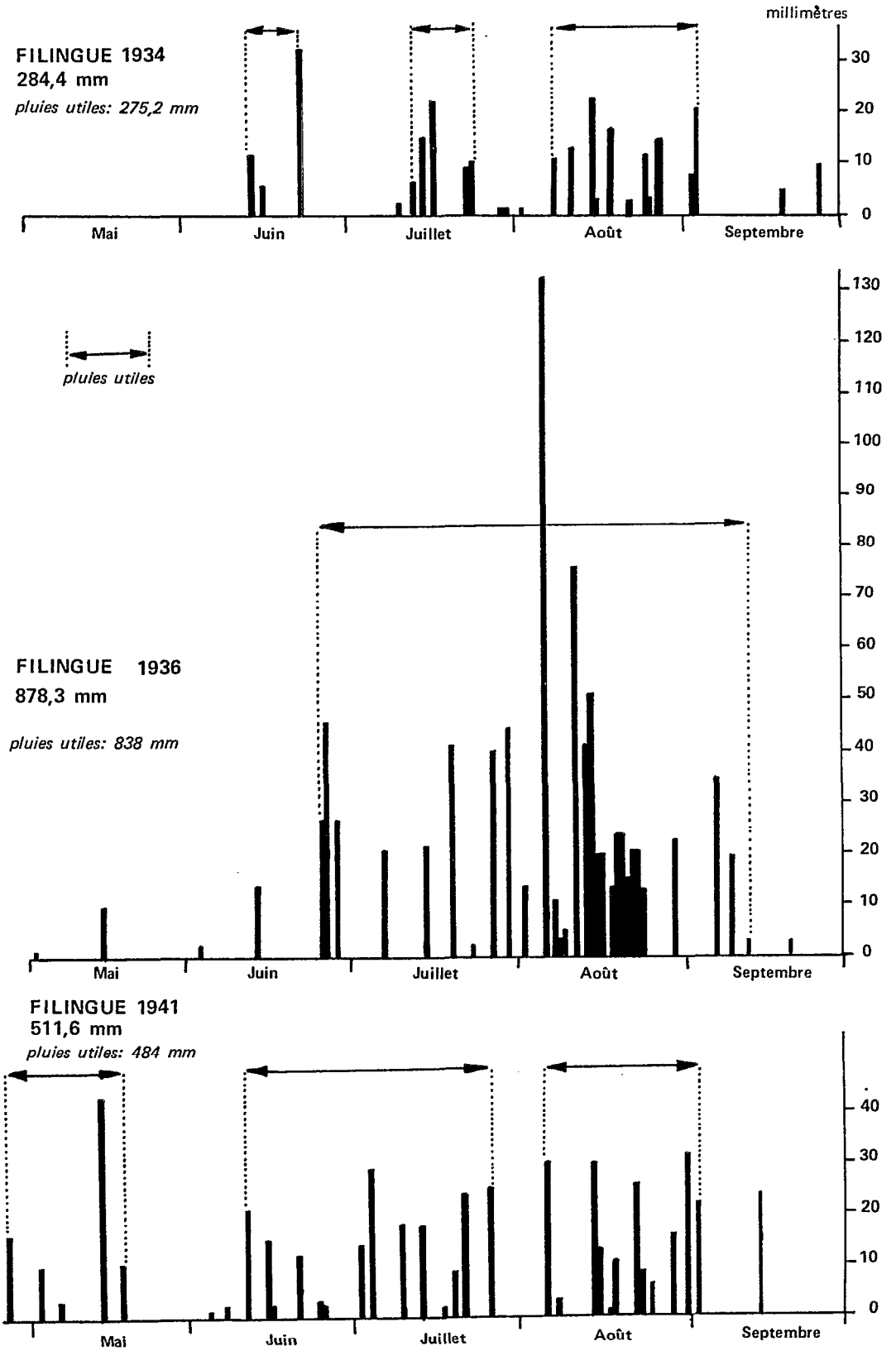

millimètres
FILINGUE 1934
284,4 mm
pluies utiles: 275,2 mm
30
20
10
0
Mai
Juin
Juillet
Août
Septembre
pluies utiles
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
FILINGUE 1936
878,3 mm
pluies utiles: 838 mm
Mai
Juin
Juillet
Août
Septembre
FILINGUE 1941
511,6 mm
pluies utiles: 484 mm
40
30
20
10
0
Mai
Juin
Juillet
Août
Septembre

Figure 5

En 1936, les pluies utiles sont rassemblées en une longue période de 82 jours, presque le double de 1934.

En 1941, les pluies utiles sont divisées en trois périodes mais dans des conditions plus favorables qu'en 1934 puisqu'elles se répartissent sur 96 jours et que la seconde interruption – 10 jours seulement – est précédée de pluies notables (1).

En ce qui concerne les céréales cultivées et les espèces végétales spontanées (herbacées annuelles notamment) la notion de pluie utile doit être modifiée en tenant compte des besoins réels de la plante, de son cycle, de la capacité de résistance à la sécheresse, de la capacité de rétention en eau du sol.

Aux *précipitations directement observables et mesurées il faut ajouter les précipitations occultes* qui ne sont pas négligeables pendant la saison des pluies. Malheureusement, elles sont rarement notées comme telles et les observations sont incomplètes et peu comparables.

Le degré hygrométrique de l'air s'abaisse brutalement lorsque l'harmattan s'installe ; il est par contre relativement élevé même dans le nord pendant la saison des pluies et pendant les périodes de transition. La rosée a certainement un rôle dans le ravitaillement en eau des végétaux (elle peut être absorbée directement par les feuilles même si elle ne s'infiltre pas dans le sol) et dans l'alimentation des animaux domestiques et sauvages qui pâturent pendant la nuit ou à la fin de la nuit des végétaux mouillés. La pluie des mangues de février (qui correspond à une remontée vers le nord des masses d'air humide côtières ou au passage, par dessus le Sahara, de masses d'air méditerranéennes) peut entraîner, en pleine saison sèche, sinon des pluies proprement dites, du moins une hygrométrie élevée « ce qui donnerait ainsi des pâturages hydratés à une période où les troupeaux sont toujours sous-abreuvés » (Bernus, 1981, *23*).

Les températures moyennes sont partout élevées (chiffres des années 1951 à 1960) :

stations	*moyenne du mois le plus froid*	*moyenne du mois le plus chaud*
Agadez	20,7 (janvier)	33,0 (mai et juin)
Tahoua	23,7 (janvier)	33,4 (mai)
Birni n'Konni	24,2 (janvier)	33,1 (mai)

Les amplitudes annuelles diminuent avec la latitude, de même que les amplitudes diurnes : cette dernière est de 17°6 à Agadez en moyenne, de 14°6 à Tahoua. L'amplitude entre le maximum et le minimum absolu est de 34°3 à Tahoua (43°2 et 8°9) et de 40° à Agadez (44°2 et 4°2) au cours de l'année 1960 (Bernus, 1981, *17*).

Pendant la saison des pluies et les périodes de transition qui la précèdent et la suivent, le régime des vents est instable : des calmes succèdent aux rafales et les directions sont variables ; c'est à ce moment que se produisent les vents les plus violents, susceptibles de mettre le sable en mouvement.

A la fin de la mousson, l'harmattan commence à souffler régulièrement du nord-est sur tout le pays, plus ou moins dévié par les reliefs ; à Agadez, il vient du sud-est ou de l'est-sud-est. La vitesse dépasse rarement 8 mètres par secondes (30 kilomètres/heure environ) qui est la limite des vents « violents ». Un rapport récent (2) constate que « la vitesse des vents violents (8 m/seconde et plus) tout comme le nombre des rafales observées chaque mois semble être en augmentation constante au cours des dernières années » ce que confirment les habitants de la région. Le vent soulève la poussière, les particules argileuses fines et le sable jusqu'à plusieurs dizaines de mètres au dessus du sol en « brumes sèches » ou vents de sable qui gênent la visibilité et empêchent la circulation aérienne. Les sables sont mobilisés et forment des petites dunes au vent ou sous le vent des obstacles (arbres, touffes d'herbes, rochers). Cette remobilisation des sables paraît en effet plus intense depuis quelques années.

(1) Le plus rustique des mils cultivés dans la région a un cycle de 70 jours.
(2) Bernus, Fauck, Peyre de Fabrègues, 1983, *12*.

Dans la vie pastorale des régions septentrionales, l'évaporation joue un grand rôle : on mène les troupeaux au pâturage la nuit, hommes et bêtes se reposent à l'ombre pendant la journée.

E. Bernus cite les chiffres d'évaporation, mesurés à l'évaporomètre Piche à la station d'Agadez (Bernus, 1981, *24*) :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Evaporation en mm/mois 1953-1964 (1)	284	304	370	413	415	346	247	170	267	342	315	289

Total : 3 762 mm

L'évaporation est fonction du vent et de la température. Elle est la plus forte pendant les trois mois de saison chaude et sèche (mars, avril, mai) et ceci est valable pour toute la région, du nord au sud.

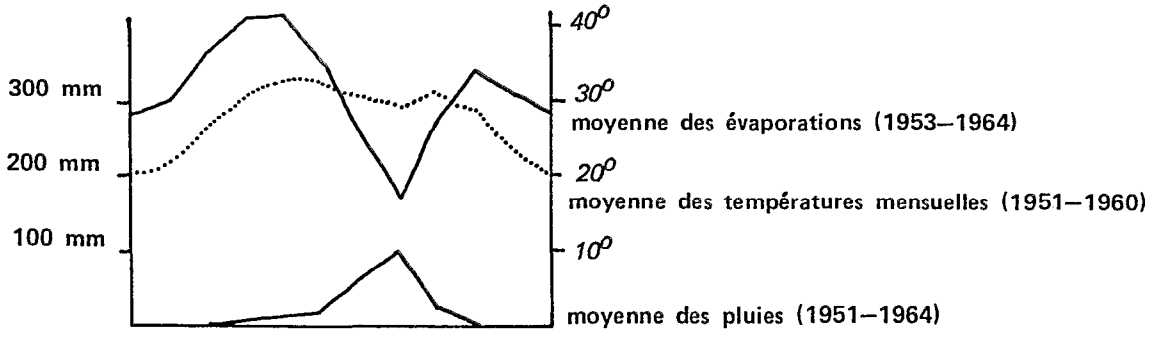


Figure 6 - Agadez

L'eau de surface et de sub-surface (mares et puisards) a alors disparu, « la coïncidence de l'évaporation maximale avec les plus fortes chaleurs éprouve durement les hommes et les animaux » (Bernus, 1981, *24*) ainsi que la végétation. « C'est la période du plus dur labeur pour le pasteur qui doit abreuver des troupeaux assoiffés, concentrés autour des puits profonds (id.). Dans le sud, c'est la période où l'eau baisse dans les puits, où le cultivateur suit avec inquiétude les tornades sèches et les nuages d'orage en attendant la première pluie, où les dieux du panthéon traditionnel sont invoqués dans les cérémonies des *yenendi* (2) pour prévenir les désastres : la foudre et l'inondation.

(1) Années de la décennie humide citée plus haut.

(2) *Yenendi*, mot zarma qui signifie *rafraîchir*, rituel de possession pratiqué dans l'ouest du Niger au cours duquel les dieux redoutables (le Tonnerre notamment) qui accompagnent la pluie dialoguent avec les hommes.

2. HYDROGRAPHIE

L'ensemble hydrographique Azawagh - Dallol Boso - Dallol Mawri est orienté nord-est sud-ouest et suit le pendage général des couches sédimentaires du bassin des Iullemmeden. Les secteurs d'alimentation principaux sont les massifs de l'Adrar des Ifoghas et surtout de l'Aïr.

Le réseau de l'Adrar des Ifoghas paraît peu dense et mal hiérarchisé. Le massif n'est pas très élevé (il culmine à 890 m), soulevé dans sa partie orientale : c'est donc vers l'ouest et le bassin du Tilemsi, dans la direction opposée à l'Azawagh que se déversent les cours d'eau qui y prennent naissance ; il alimente peu les pays de l'Azawagh.

L'Aïr est plus élevé (il culmine à 2 022 m (1)) et relevé lui aussi à l'est. Cette fois, c'est l'Azawagh qui profite de la direction générale est-ouest des cours d'eau issus de l'Aïr. Le réseau est abondant et bien hiérarchisé ; il conflue à la sortie du massif, dans la région d'In Abangharit, avec le Timmersoï issu de l'Ahaggar.

Le système de l'Azar est issu du plateau de la Tadarast, c'est-à-dire du revers de la cuesta de Tigidit et de la base de la cuesta cénomano-turonienne mais il existe un hiatus visible au nord et au sud du système de l'Azar qui peut être dû à l'ensablement récent, le même qui aurait détourné la rivière de Shi Walemban vers le nord.

Au sud et au sud-est de l'Azar, un système reste visible quoique de tracé incertain et fragmentaire : celui qui, issu du revers de la cuesta de Tigidit et suivant strictement la direction structurale rejoint le système du Dallol Mawri.

Le système de l'Azagaret est issu de l'Adrar des Ifoghas. Il conflue avec l'Azawagh au niveau du coude de Tabala.

Au sud du 14e parallèle, toutes les directions sont nord-sud ; les affluents du Dallol Boso et du Dallol Mawri sont courts et issus des plateaux locaux.

Sauf dans l'Aïr montagneux et escarpé, les pentes sont faibles : l'Azawagh est à 350 mètres à In Abangharit, à 172 mètres à Boumba, soit une pente de 0,22 % en moyenne sur 805 kilomètres.

Le régime général d'écoulement est celui des oueds caractérisé par des crues violentes directement liées aux pluies locales, qui progressent plus ou moins loin selon l'abondance de l'alimentation, le faciès du bassin, et des circonstances occasionnelles dans lesquelles l'évolution du couvert sableux joue un rôle.

Les vallées qui descendent de l'Aïr ont un fonctionnement saisonnier : les pluies qui tombent sur le massif permettent un ou plusieurs épisodes d'écoulement chaque saison ; il en est de même dans les vallées qui descendent de l'Adrar des Ifoghas. Ce fonctionnement disparaît dans toute la partie centrale du réseau qui n'est plus alimentée par les pluies locales (insuffisantes en quantité) ni par le réseau amont dont les crues ne progressent pas jusque là, interrompu au surplus par l'ensablement.

Le fonctionnement saisonnier, alimenté par les pluies locales, ne réapparaît qu'au sud du 15e parallèle. L'apport de l'Azawagh au fleuve Niger est donc extrêment réduit, sinon nul.

Seul le fleuve Niger fonctionne toute l'année grâce au retard de la crue annuelle dans la cuvette lacustre malienne : le Niger moyen voit sa crue annuelle en pleine saison sèche et celle-ci doit être relayée par les pluies locales sur les affluents de rive droite (Goruol, Sirba, Gorubi...) pour que le débit du fleuve ne s'interrompe pas en fin de saison sèche.

L'Azawagh - Dallol Boso et le Dallol Mawri sont des *vallées fossiles* (vallées mortes conviendrait mieux, car il n'y a pas conservation des formes), larges de plusieurs kilomètres, bien marquées par des falaises ou des talus nets ; elles ne fonctionnent pas en saison des pluies, les eaux s'y perdent en une multitude de mares et d'effluents divergents, à l'écoulement variable d'une année à l'autre...

(1) Au mont Idukal n'Taghes, dans les Bagzan (au sud du massif) d'après les cartes récentes (IGN 1978).

Dans ce bassin hydrographique, seules les périphéries sont fonctionnelles : dans le centre de la région, là où l'alimentation se fait plus irrégulière et moins abondante, les anomalies hydrographiques et les indices de désorganisation se multiplient : inversions du sens de l'écoulement, abandons de parcours ...

Des nappes d'inféroflux existent dans la plupart des vallées sableuses, alimentées par les pluies de l'année. Elles entretiennent une végétation arborée bien visible dans les paysages au nord en raison de leur rareté même et pendant quelques semaines ou quelques mois après la fin des pluies, les puisards creusés par les pasteurs ou les villageois. C'est dans les grandes vallées que se forment en saison des pluies les chapelets de mares qui permettent d'abreuver les troupeaux.

Les vallées constituent donc, même non fonctionnelles, un milieu attractif car l'eau y est accessible avec moins de difficultés et pendant davantage de temps que partout ailleurs (1).

3. GEOLOGIE ET STRUCTURE

Les pays de l'Azawagh sont compris tout entiers dans le bassin sédimentaire appelé par les géologues *bassin des Iullemmeden.* Les séries géologiques sont disposées en auréoles concentriques entre les masses antécambriennes du nord (Adrar des Ifoghas, Ahaggar et Aïr) et celle du sud (le socle affleurant dans le Liptako-Gurma).

Le relief de tout le bassin est plat et monotone. La pente générale est très faiblement inclinée du nord-est au sud-ouest : l'altitude moyenne est de 500 mètres environ dans le voisinage d'Agadez, elle est de 150 mètres au confluent Dallol Boso - Niger.

Les cuestas elles-mêmes (voir figure 7) ne constituent pas de bien grands reliefs : les plus importants sont la falaise de Tigidit (entre 30 et 80 mètres de dénivellation) et les buttes-témoins escarpées qui parsèment la plaine de l'Eghazer wan Agadez. Les autres cuestas forment des alignements de buttes et des éboulis adoucis.

Les travaux géologiques sur les aires septentrionales de l'Azawagh se rattachent aux recherches sahariennes et aux entreprises de prospection minéralogique : Kilian, Faure, Joulia, Greigert, le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) ont publié cartes et interprétations... Toutes les classifications ne sont pas concordantes car des formations considérées comme de transition ou susceptibles d'appartenir à l'une ou l'autre classe sont placées différemment selon les auteurs, qui citent d'ailleurs souvent les difficultés d'observation et la variété des faciès qui gênent l'interprétation. Nous reprenons ici les travaux les plus complets et les plus homogènes sur le bassin des Iullemmeden (et sur le Niger tout entier), ceux de J. Greigert (Greigert 1966, Greigert et Pougnet 1967), qui ont l'intérêt d'être accompagnés d'une cartographie très soignée. Nous les avons complétés, pour le Continental intercalaire, par les données récentes du CEA, 1978 et 1981.

La carte de la figure 8 reproduit les contours et l'organisation géologique du bassin. On trouvera ci-dessous une brève description des formations en partant du nord-est au sud-ouest, c'est-à-dire du plus ancien au plus récent.

L'Aïr est constitué pour les trois quarts de formations du Précambrien inférieur (Suggarien) métamorphique et migmatitique avec des granites anciens et des granites jeunes à structure annulaire. On y trouve deux types de volcanisme : un volcanisme acide plus jeune que les granites les plus jeunes et un volcanisme basaltique quaternaire. L'ensemble contient des indices de minéralisation : seule la cassitérite est exploitée,

(1) C'est le temps passé au puisage pour l'abreuvement des animaux et les besoins en main d'œuvre qui en découlent qui limitent le volume des troupeaux.

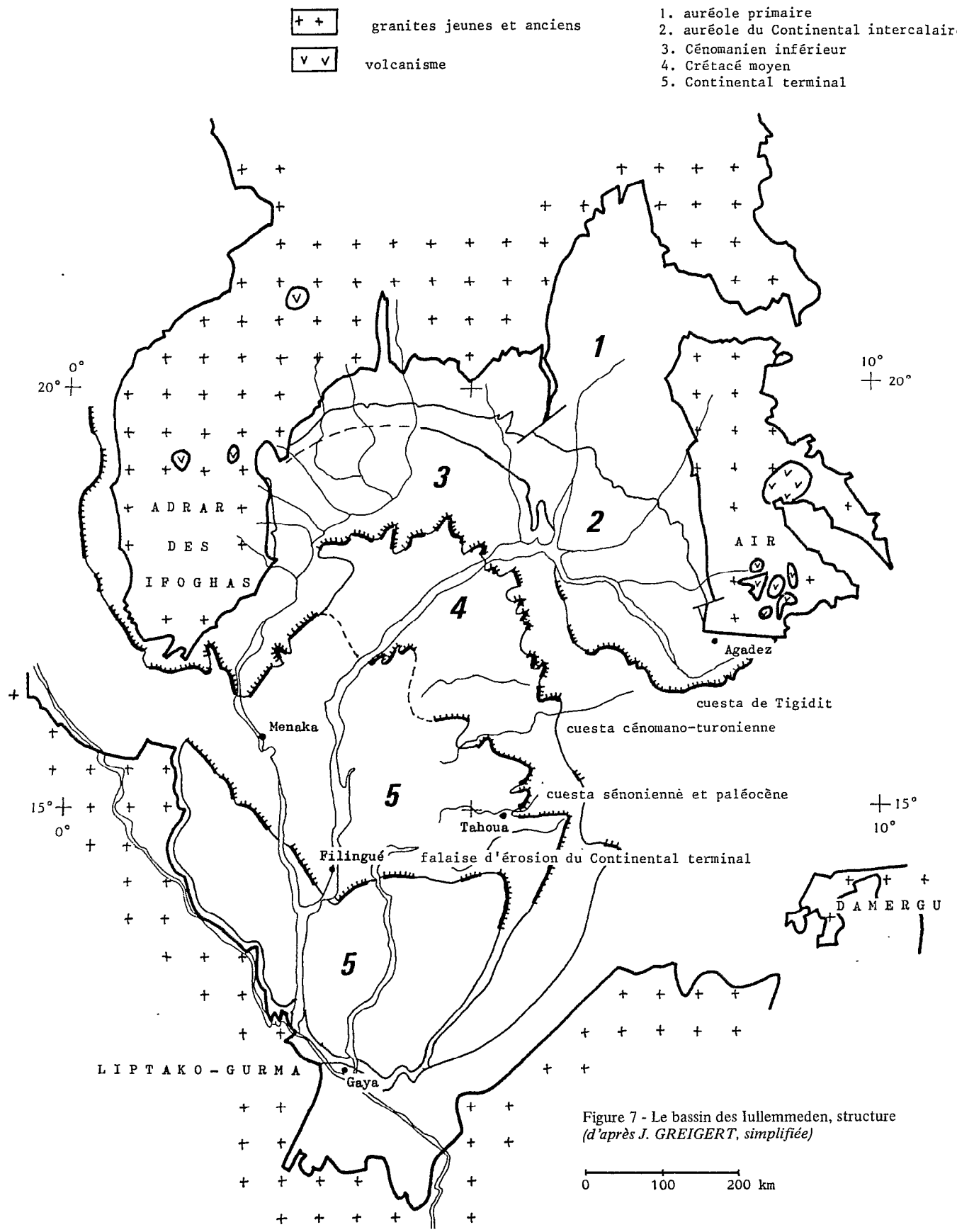


Figure 7 - Le bassin des Iullemmeden, structure
(d'après J. GREIGERT, simplifiée)

de façon quasi artisanale, et les eaux thermales de Tafadeq sont couramment utilisées par les populations locales et renommées même hors des frontières nationales.

L'Adrar des Ifoghas présente des caractéristiques générales voisines. A l'opposé au sud-ouest, le socle du Liptako-Gurma est constitué de roches métamorphiques et granitiques, recoupées de dolérites en filons.

Les formations primaires les plus anciennes remplissent le golfe Ifoghas-Aïr-Ahaggar : grès, schistes et argiles s'y succèdent depuis le Cambro-ordovicien jusqu'au Namurien.

1. Faure et Joulia (1952) font commencer le bassin des Iullemmeden proprement dit avec la *série d'Izegwandan* (1). Westphalien à Continental inférieur, formée de grès arkosiques grossiers à galets hétérogènes et argiles rouges gréseuses, épaisse d'environ 180 m et diminuant du nord au sud.

2. Le groupe des *grès d'Agadez* (Jurassique) repose en discordance sur la série précédente. On y distingue plusieurs formations *(grès du Telwa, série de Chirozerin, grès d'Asawas),* grès grossiers, grès à analcimes et grès arkosiques à stratification entrecroisée et bois silicifiés. Les éléments détritiques sont alternativement fins et grossiers, les analcimes sont présumées d'origine volcanique.

La partie supérieure des *grès d'Agadez* appelée *grès d'Asawas* représente la transition avec les formations de l'Eghazer par ses faciès argilo-gréseux et la richesse des débris organiques, écailles et restes de poissons.

3. Les *argilites de l'Eghazer* (Crétacé inférieur) : « à leur zone d'affleurement correspond une plaine couverte de regs sombres ou d'épandages argileux dont la sévère monotonie contraste avec les paysages variés des régions voisines » (2).

D'après Joulia (3) les argilites de l'Eghazer reposent en discordance sur les formations antérieures. L'ensemble est caractérisé par des argiles rouges gréseuses ou marneuses quelquefois silicifiées ; la stratification croisée est fréquente. Les « argilites » sont constituées à 50 % au plus d'argiles (montmorillonites et illites), de carbonates et d'analcimes (Greigert 1967, *26*). Les restes de faune y sont relativement importants (dinosauriens notamment). « Les argilites de l'Eghazer correspondent à une phase de sédimentation fine ou chimique dans des lacs ou marécages » (Greigert et Pougnet 1967, *112*). Greigert accorde aux argilites de l'Eghazer une puissance de 600 mètres au niveau d'In Gall. Les travaux plus récents du CEA lui accordent entre 400 et 500 mètres. Les argilites de l'Eghazer et les grès d'Agadez constituent l'essentiel des formations dans lesquelles s'est creusé le bassin hydrographique actuel de l'Eghazer wan Agadez. Des accidents tectoniques, en particulier des lignes de fracture orientées est-nord-est/ouest-sud-ouest ont conservé, à l'intérieur du bassin, des buttes-témoins de la formation ultérieure des *grès de Tegama* (buttes d'Anyokan, de Teleginit, d'Azuza...) et des boutonnières des *grès d'Agadez* (Azelik et Aboy). Une ligne de fractures nord-sud fait apparaître un compartiment des *grès d'Agadez* dans la région d'Asawas - Tegidda n Adrar.

Les fractures dans les *grès d'Agadez* et les contacts par fracture entre *grès d'Agadez* et *argilites de l'Eghazer* révèlent en surface ou à faible profondeur des minéralisations cuprifères et des sources salines.

4. Les *grès du Tegama* : « la sédimentation du groupe du Tegama est caractérisée par une multitude de séquences grès - silts - argiles plus ou moins complètes se juxtaposant, se chevauchant ou se superposant et associées au remplissage de vastes dépressions chenalisantes » (CEA, notice de la carte *Tegama,* 1981, *50*).

Les *grès du Tegama* ont une puissance d'environ 800 m. Ils se raccordent aux *argilites de l'Eghazer* par une cuesta très nette, la falaise de Tigidit. Les bois silicifiés sont très abondants et constituent l'une des caractéristiques spectaculaires de la formation, avec troncs et branches en place.

---

(1) Nous avons systématiquement simplifié les orthographes d'après le mode cité page 28 : Izegwandan au lieu de Izegouandane, Asawas au lieu de Assaouas, etc...
(2) J. Greigert et R. Pougnet, 1967, *111.*
(3) Cité par Greigert et Pougnet, 1967, *112.*

Dans la région d'In Gall, les grès du Tegama sont surmontés de formations argileuses à nodules de fer et de manganèse et par endroits d'une cuirasse ferrugineuse massive en bancs de un à deux mètres, présumée récente ou tertiaire (CEA, 1981).

5. Au cénomanien inférieur, la série dite *de Farak* est composée de grès grossiers bariolés argileux à feldspaths. Dans la partie supérieure, les argiles alternent avec les grès argileux.

6 et 7. Les *séries cénomano-turoniennes* correspondent à des formations deltaïques, lagunaires et marines. Elles sont constituées de grès, de calcaires à lumachelles et d'argiles. Le turonien (**7**) est constitué de niveaux calcaires encadrés d'argiles sans grès bien francs.

Les formations calcaires forment la *cuesta cénomano-turonienne,* discontinue et assez peu marquée dans le paysage. Elle ne mesure pas plus de 25 mètres de dénivellation en talus obliques. En arrière de la cuesta, les formations sont masquées par une épaisse couche de sables quaternaires constitués en ergs aujourd'hui fixés.

8. La *série sénonienne* fait suite en continuité aux précédentes. Elle est constituée par une quinzaine de mètres d'argiles gypseuses et marneuses avec quelques formations calcaires, le tout d'origine marine et lacustre.

9. Au *sénonien supérieur,* qui fait suite au précédent, les séries sont constituées de grès fossilifères. Avec les formations éocènes suivantes le sénonien constitue la cuesta *sénonienne-paléocène.*

10. La *série paléocène* est un ensemble fossilifère de marnes et de calcaires blancs encadrés par des schistes papyracés, surmontés de grès et d'argiles ferruginisés. L'induration ferrugineuse sommitale a protégé les formations sous-jacentes qui subsistent en buttes escarpées, constituant la *cuesta sénonienne-paléocène,* très ravinée par endroits, couverte d'éboulis et précédée d'un talus argileux.

L'ensemble du *Continental terminal* s'étend dans le bassin des Iullemmeden depuis la falaise paléocène jusqu'au fleuve Niger. Il forme de vastes plateaux monotones fortement entaillés par l'érosion et par les vallées fossiles. Son épaisseur est de 450 mètres à Dogondoutchi. Il disparaît contre le socle birrimien méridional.

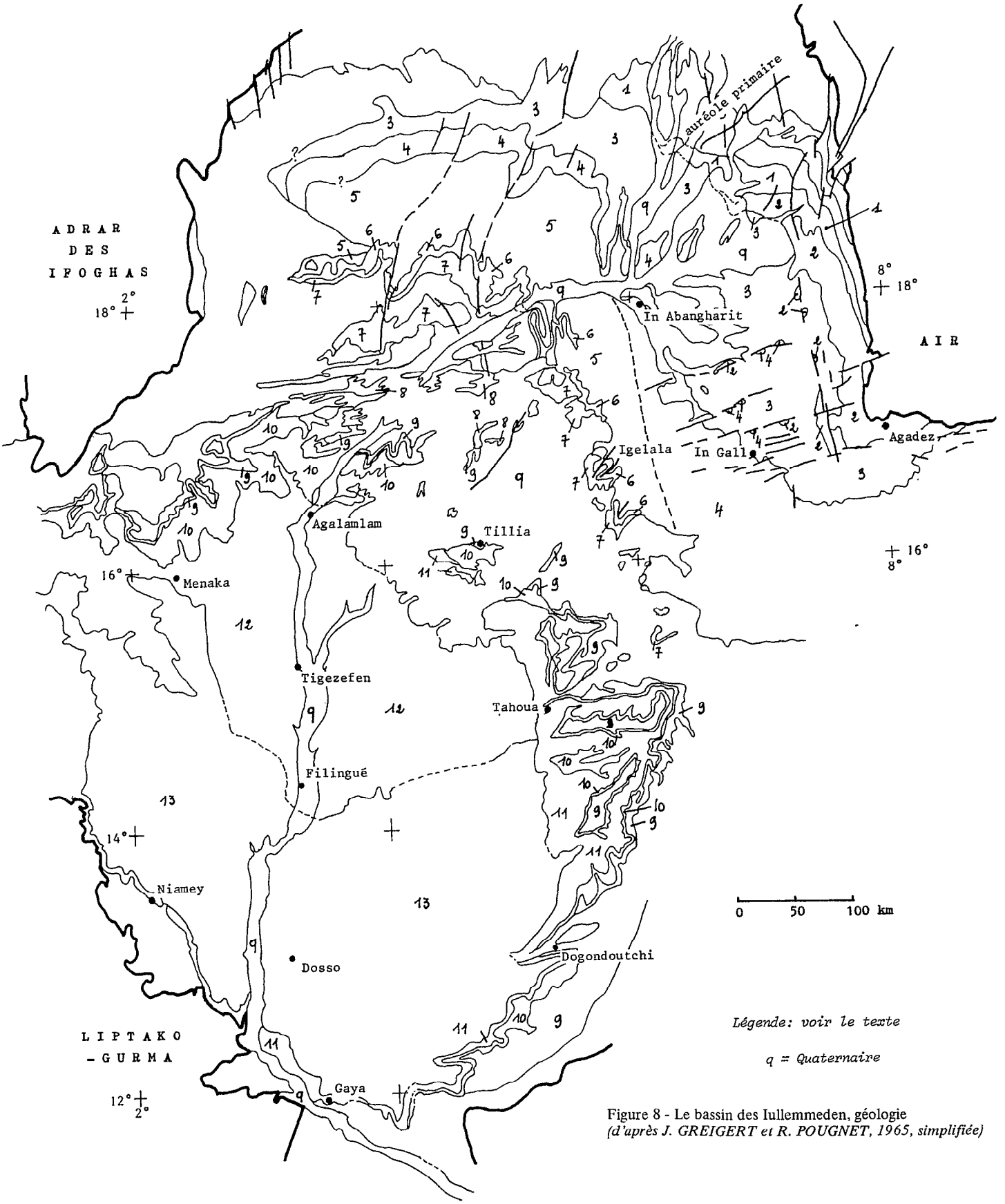
11. La *série sidérolithique de l'Ader (*ou *série sidérolithique de l'Adar Doutchi)* est formée d'argiles ferrugineuses, de sables fins et de grès ferrugineux à goethite par endroits. La puissance est de 80 mètres à Dogondoutchi et se réduit vers l'ouest.

12. La *série argilo-sableuse à lignites* est peu distincte dans ses contours car abondamment recouverte de sables quaternaires. Sur la carte de Greigert et Pougnet (1965) elle est représentée associée avec la précédente dans ses affleurements nord et ouest (massif d'Agalamlam (1), région de Ménaka-Tigezefen). A l'ouest de Tahoua et autour de Filingué, elle est constituée de vases contenant des amas de bois houillifié, des sables cimentés par des oxydes de fer en carapace, des argiles. Greigert et Pougnet notent que des bassins à sédimentation presque argileuse peuvent s'individualiser à côté de régions à sédimentation uniquement sableuse. La sédimentation est présumée lacustre ou deltaïque, ou marécageuse en milieu acide.

13. *Les grès argileux du moyen-Niger :* ils constituent des surfaces planes en plateaux ; les roches sont tendres, succession bien stratifiée de grès et d'argiles. La sédimentation est fine et les bancs réguliers, impliquant le dépôt dans de vastes lacs calmes. Cette formation est le support caractéristique de la végétation appelée *brousse tigrée.*

---

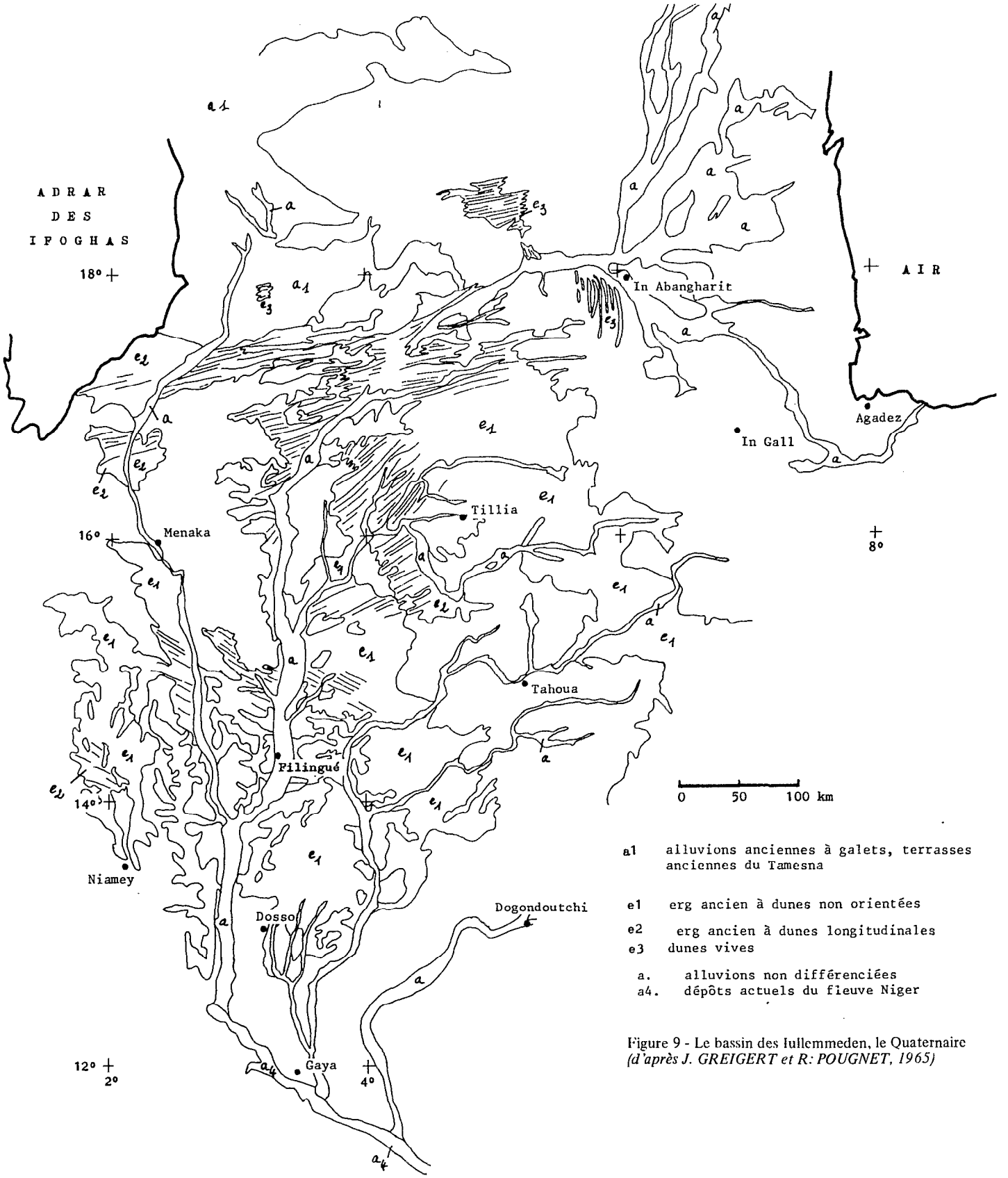
(1) Le petit massif rocheux et caillouteux qui culmine à 371 mètres entre les vallées de l'Azawagh et de l'Azar ne porte pas de nom unique sur les cartes. Pour simplifier sa désignation, nous lui donnons ici le nom de *massif d'Agalamlam,* du nom d'un puits important situé dans l'une de ses principales vallées.



Légende: voir le texte

q = Quaternaire

Figure 8 - Le bassin des Iullemmeden, géologie
(d'après J. GREIGERT et R. POUGNET, 1965, simplifiée)



a1 alluvions anciennes à galets, terrasses anciennes du Tamesna

e1 erg ancien à dunes non orientées

e2 erg ancien à dunes longitudinales

e3 dunes vives

a. alluvions non différenciées

a4. dépôts actuels du fleuve Niger

Figure 9 - Le bassin des Iullemmeden, le Quaternaire *(d'après J. GREIGERT et R: POUGNET, 1965)*

Dans le bassin des Iullemmeden, on rencontre deux types de formations quaternaires : les alluvions déposées dans les grandes vallées (fleuve Niger, vallées fossiles et leurs affluents) ; les accumulations éoliennes, largement déposées à travers toute la région et qui présentent des faciès variables : accumulations non organisées, ergs orientés, grandes dunes sub-circulaires isolées ou en massifs...

Mais le Quaternaire est encore mal connu au Niger, sauf peut-être dans la cuvette tchadienne. Les études géologiques lui font peu de place et les études géomorphologiques sont encore limitées : « dans le bassin des Iullemmeden, aucune étude systématique du Quaternaire n'a été entreprise malgré l'extension considérable des formations de cette ère » (Greigert et Pougnet, 1967, *171*). La carte de la page précédente présente la répartition géographique des diverses formations quaternaires identifiées par J. Greigert dans le bassin des Iullemmeden. Faute d'informations suffisantes, les alluvions ne sont pas datées.

Figure 9 :

a1. Alluvions anciennes à galets et terrasses anciennes du Tamesna : elles ne se rencontrent ici qu'en bordure du massif de l'Adrar des Ifoghas et seraient le témoin d'une phase de comblement postérieure à l'organisation du réseau de drainage dans ses orientations actuelles vers le sud et l'actuelle vallée du fleuve Niger.

e1. Erg ancien étendu vers le sud jusqu'au 12e parallèle.

e2. Erg postérieur à e1 et à une période humide intermédiaire. Il est caractérisé par les longs cordons dunaires parallèles qui se retrouvent depuis la Haute-Volta jusqu'au Tchad, très visibles sur images Landsat.

e3. Ergs vifs d'extension limitée.

a. Alluvions non différenciées des vallées actuellement non fonctionnelles ou saisonnières. Ce sont partout des alluvions sableuses, souvent reprises par l'érosion éolienne dans les vallées même sauf en ce qui concerne les vallées de l'Eghazer wan Agadez et ses affluents de rive gauche qui portent des alluvions argileuses.

Les alluvions de l'Azawagh ont comblé une profonde vallée entaillée jusqu'à une quarantaine de mètres au-dessous du niveau actuel (forage de Tigezefen : Greigert et Pougnet 1967, *172*). Cette puissante érosion est placée chronologiquement entre a et e1.

Remblaiements et creusements se succèdent alors au rythme des périodes pluviales et sèches. Les ergs modifient le réseau hydrographique, obligeant les rivières à s'insinuer dans les creux interdunaires ou les interrompant même (l'Azawagh par l'erg e2).

a4. Alluvions actuelles ou sub-actuelles du fleuve Niger, déposées à partir de son confluent avec l'Azawagh : en amont de ce confluent, le Niger coule sur le bed-rock entre des terrasses résultant d'une accumulation plus ancienne. Faute d'informations précises, il est difficile de dire si, en aval de Bamba, le Niger alluvionne ou creuse *actuellement*.

Les formations quaternaires et leurs remaniements témoignent d'un passé climatique mouvementé et contrasté : phases pluviales et phases arides se sont succédées sans qu'il soit possible pour l'instant de fixer des chronologies locales certaines. Greigert et Pougnet ont proposé une chronologie relative concernant tout le Niger, fondée sur les observations effectuées dans la cuvette tchadienne. C'est la même région que Servant (1973) et Maley (1981) ont étudiée dans le détail pour proposer des hypothèses paléo-climatiques. A partir de leurs travaux, de ceux de Rognon et Beaudet (1976) et de Durand (1983) nous traçons, pour le Quaternaire récent, le tableau de la figure 10 (Bernus et Poncet, 1984).

Pour l'instant, les études les plus précises dont nous disposons sur les pays de l'Azawagh résultent d'observations rapides et superficielles effectuées par une équipe non spécialisée avec quelques points

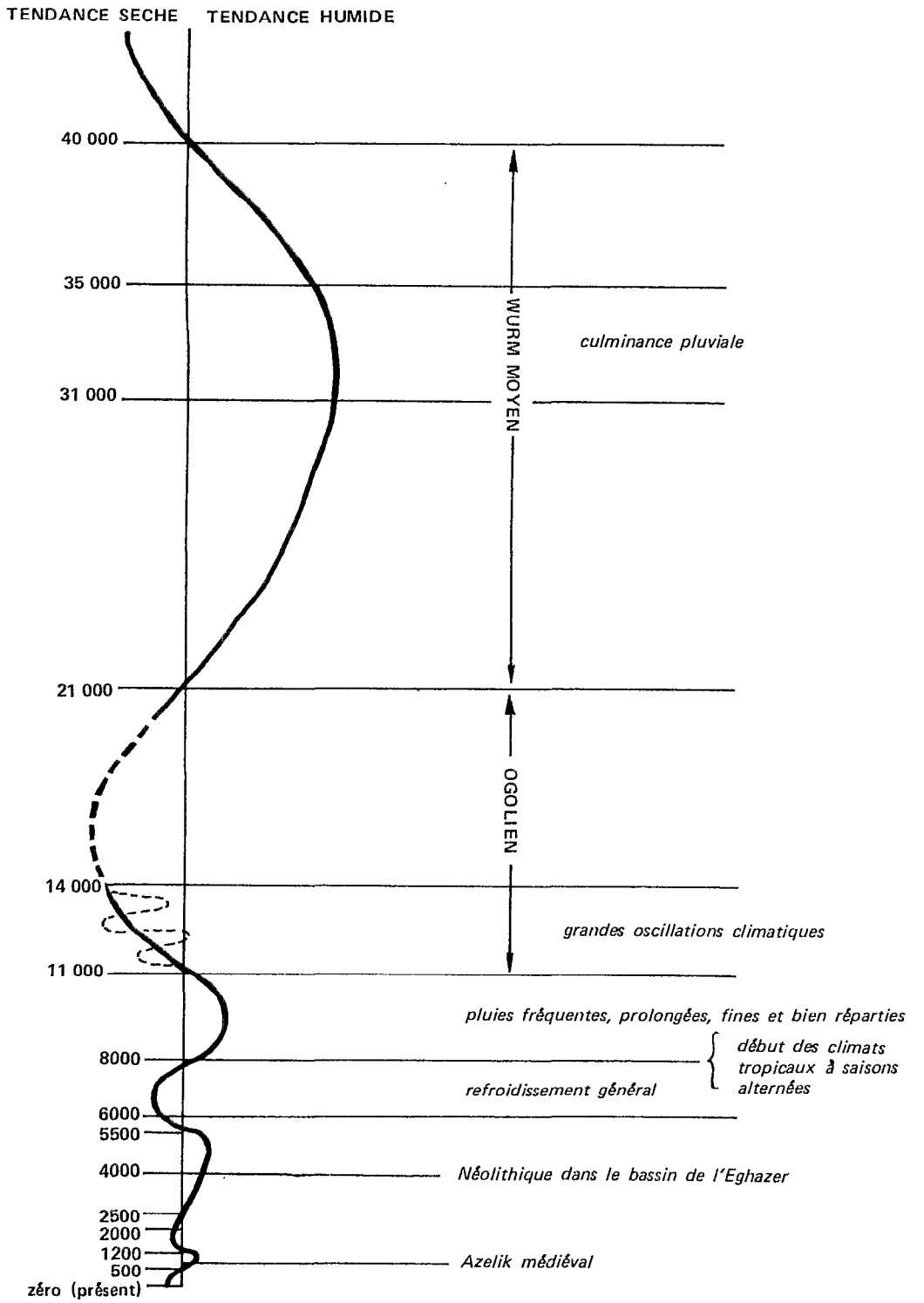


Figure 10 - Représentation schématique des phases climatiques de la bordure sud du Sahara depuis le quarantième millénaire
(d'après ROGNON et BEAUDET, 1976 ; DURAND, 1983. (BERNUS et PONCET, 1984)

d'appui (Morel : communications orales) dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez. Le rapprochement de phases de creusement et d'accumulation (alluviales et éoliennes), des témoignages indirects (végétation, archéologie) ou directs (vernis et patines) ont permis d'établir, pour le Quaternaire très récent, des chronologies relatives. La position du bassin, au pied d'un massif montagneux mieux arrosé que les plaines environnantes et pouvant constituer un abri fait que les indications qu'elles fournissent ne peuvent guère être extrapolées ailleurs dans l'Azawagh.

C'est probablement au cours du Quaternaire récent, lors de phases climatiques un peu plus humides qu'aujourd'hui que les roches et cailloux dénudés de la zone sub-saharienne se sont recouverts du vernis noir improprement appelé « patine saharienne ». Les roches compactes et les épandages de cailloutis apparaissent ainsi fréquemment sous forme de surfaces très sombres, tranchant sur les sables clairs environnants. Les argiles rouges ou grises de l'Eghazer wan Agadez constituent aussi des paysages sombres sur de grandes étendues, coupés çà et là par des alluvions sableuses dans les vallées ou par les prairies de *tazmey,* herbacée annuelle caractéristique des bas de talus. Taches sombres et taches claires sont ainsi juxtaposées en surfaces contrastées. Plus au sud, les surfaces ferralitiques apportent elles aussi, au milieu des sables, leur part de contraste dans les paysages.

Il n'est pas impossible que ces contrastes d'albedo entraînent des modifications locales de la répartition des températures, des humidités et des pluies. Quoi qu'il en soit, ce sont ces vastes aires « noires » tranchant sur de vastes aires « blanches » qui donnent aux pays de l'Azawagh leur apparence si aisément repérable sur les images spatiales Landsat et Météosat...

4. SOLS ET COUVERT VEGETAL

«Le facteur écologique le plus important est la capacité d'absorption et de rétention d'eau dans le sol » (Peyre de Fabrègues et Rippstein, 1972).

C'est donc la combinaison de la latitude, des facteurs pédologiques et éventuellement de la proximité de la nappe phréatique qui va donner les grandes lignes des différenciations végétales.

Les informations pédologiques disponibles sur la région ne couvrent que sa partie sud, jusqu'au 15e parallèle. Elles sont cartographiées et détaillées (Gavaud et Boulet, 1964) mais mettent l'accent davantage sur les caractères génétiques des sols que sur leur composition et leur capacité de rétention de l'eau.

En ce qui concerne la végétation, il n'existe pas de carte des formations végétales à proprement parler : la carte des pâturages de l'IEMVT (1971) décrit, pour la zone pastorale seulement, la qualité des pâturages en fonction des types de sols et des espèces botaniques caractéristiques. Une cartographie établie par J. Koechlin en 1976 sur la région de Maradi (hors de notre propos, par conséquent) inventorie les types de végétation selon les ensembles morpho-pédologiques ; les cartes de l'IGN au 1/200 000 portent des indications partielles sur la végétation sous une forme assez vague impliquant la densité des individus (« steppe », « savane arborée » ...). Avec cette documentation, il est donc difficile de tracer un tableau complet des paysages végétaux. Tout au plus peut-on donner quelques informations d'ensemble relatives au Niger central et occidental.

Plus que sur les classifications savantes fondées sur les associations botaniques ou les caractères pédologiques, nous nous fondons ici sur les « classifications vernaculaires »; la perception qu'ont les habitants eux-mêmes des différents types de territoires. Dans les aires cultivables du sud aussi bien que dans les régions pastorales du nord, les sols peuvent être classés selon leur texture, qui conditionne étroitement leur capacité de rétention de l'eau : sols sableux, sols argileux, régolithes et cuirasses.

Au nord de l'isohyète 100 - 150 mm, on se trouve dans le domaine saharien : dunes, bas-fonds argileux, terrains caillouteux et rocheux forment la totalité du support de la végétation. Les sols sont squelettiques

ou peu évolués, sols minéraux bruts sans matière organique. La végétation est nulle non seulement sur les dunes vives (peu nombreuses) mais aussi sur les terrains caillouteux et rocheux. Sur les sables des dunes fixées on rencontre une végétation herbacée où les vivaces dominent en touffes isolées (*Panicum turgidum* principalement). Quelques graminées annuelles apparaissent dans certaines conditions (bas de pentes argilo-sableuses) telles celles de la famille des *Aristida (Aristida plumosa, A. hordeacea, A. mutabilis...).* Les ligneux sont rares, très espacés, buissonnants : *Acacia ehrenbergiana* y domine.

Sur les terrains argileux, la végétation vivace disparaît au profit des annuelles quand les conditions pluviométriques de l'année ont été bonnes : on rencontre les *Aristida* citées ci-dessus, *Schouwia thebaica,* pâturage de grande qualité, qui pousse dans les fentes de retrait des argiles remplies de sable.

Entre 100-150 mm et 300-400 mm, on est en zone nord-sahélienne. La strate herbacée, discontinue au nord, tend à se resserrer au sud jusqu'à former un tapis continu. *Cenchrus biflorus* (le redoutable cram-cram) et *Tribulus terrestris,* non moins gênant (tous deux à cause de leurs épines acérées) apparaissent tandis que l'on rencontre toujours les *Aristida* en tapis serré et *Panicum turgidum* en touffes de plus en plus épaisses. Des arbres plus variés et plus grands prennent place : *Acacia ehrenbergiana,* toujours, mais aussi *Acacia raddiana, Acacia nilotica, Commiphora africana* (1). *Balanites aegyptiaca et Maerua crassifolia* apparaissent dans les vallées.

Les aires argileuses sont, ici aussi, pratiquement dénudées en saison sèche. Seules les annuelles se rencontrent dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez : les *Aristida, Sorghum aethiopicum* dans certaines conditions particulières, *Pennisetum mollissimum, ...*

A partir des isohyètes 300 ou 400 mm, on entre dans la zone sahélienne proprement dite qui est aussi la zone des peuplements sédentaires, des occupations agricoles et des sols un peu plus évolués.

Les espèces sont plus diversifiées et le tapis végétal spontané est continu ou presque. L'emprise agricole est extrêmement forte et on ne peut guère parler en réalité de végétation *naturelle* tant les défrichements, jachères, pâtures et piétinements ont transformé le milieu.

Les herbacées sont vivaces (*Andropogon gayanus,* qui sert à faire les toitures des cases et les palissades) ou annuelles (*Aristida funiculata)* ; les arbres conservés par les agriculteurs pour leur intérêt sont *Acacia albida, Balanites aegyptiaca, Anogeissus leiocarpus, Prosopis africana* et, dans les zones méridionales, rare et toujours remarquable, *Adamsonia digitata,* le baobab.

Les plateaux plus ou moins cuirassés portent une végétation plus pauvre et plus contractée que les vallées sableuses. Ceux du Continental terminal sont le domaine de la *brousse tigrée,* formation à combrétacées des sols dégradés.

Dans les grandes vallées mortes et partout où la nappe phréatique est accessible aux racines en permanence, certaines espèces remontent plus loin vers le nord ; dans le Dallol Boso se rencontre en peuplements quasi exclusifs *Hyphaene thebaica* le palmier doum, demandeur d'eau mais peu exigeant quant à la qualité des sols.

La topographie différencie des modes de drainage ou d'irrigation naturelle qui paraissent avoir un rôle important dans la distribution de la végétation. Certaines espèces craignent l'excès d'eau et disparaissent des bas-fonds : c'est la ligne de rupture de pente qui porte la végétation la plus dense, profitant ainsi de l'apport d'eau direct (par concentration après ruissellement) et indirect (par proximité de la nappe) et d'un drainage satisfaisant. Les bas-fonds trop abondamment argileux sont dénudés.

A l'extrême sud du Dallol Mawri se situe la petite zone qui, au Niger, est concernée par un climat et des paysages de type soudanien. Les grands arbres sont présents dans les vallées et sur les plateaux, les combrétacées sont conservées sur les sols ferrugineux et argileux ; *Acacia albida* a disparu (la pluviométrie

(1) L'*adaras* des Touaregs qui a donné son nom à toute une région, la *Tadarast,* au sud de la falaise de Tigidit. *Commiphora africana* offre la particularité exceptionnelle de ne porter ses feuilles que pendant les quelques semaines de la saison des pluies.

est trop importante) mais les grands arbres soudaniens sont présents : le karité, le kapokier et, dans le Dallol Mawri, les forêts de rôniers.

Dans la région de Birni n'Gaouré et dans la vallée du Fogha, des sols fortement salés portent *Cynodon dactylon* à l'exclusion d'autres espèces.

Les sols de toute la zone cultivée sont médiocrement fertiles et fortement dégradés, ils portent une végétation appauvrie en quantité et en variété par l'exploitation. A. Beauvilain (1977, *47*) cite des exemples de disparition, en quelques années, de formations arborées autrefois denses dans la région de Birni n'Gaouré. Les arbres les plus gros (les plus vieux, donc) subsistent seuls dans le paysage posant à terme le grave problème de leur remplacement.

Dans la partie septentrionale, soumise à la pression des éleveurs, la question de la « désertification » reste en suspens : si des traces indéniables de dégradation sont relevées, il convient de les nuancer en fonction des conditions locales et temporelles ; il est vrai que « les arbres meurent » au nord Sahel, il est vrai aussi que de jeunes forêts drues y renaissent (Bernus et Poncet, 1984)... Cependant *Calotropis procera,* « les cheveux blancs de la terre » comme la nomment les nomades touaregs, est présente partout où la présence humaine se fait sentir trop lourdement sur le milieu naturel, en zone pastorale et en zone sédentaire...

5. LES RESSOURCES EN EAU

Sauf à l'extrême sud de la région, la durée ordinaire de la saison des pluies ne dépasse pas quatre mois et les cours d'eau sont tous temporaires : peu après la dernière pluie, les écoulements cessent jusqu'à l'année suivante et les seules ressources en eau désormais disponibles dans tout l'Azawagh, dans les dallols et sur les plateaux, consistent en l'eau du sous-sol, accessible à plus ou moins grande profondeur, rarement celle des mares de longue durée.

L'eau du sous-sol est atteinte par des puisards quand la nappe phréatique est proche, par des puits le plus souvent et depuis la modernisation des équipements dans certaines aires favorables, par des forages profonds.

Dans le nord de la région, les puisards s'assèchent quelques semaines après la fin de la saison des pluies. Les pasteurs se replient alors vers les puits profonds et les dures contraintes (en temps et en personnel) du puisage à la main ou mieux, vers les forages dont l'eau, artésienne ou pompée par moteurs, coule au niveau de la surface.

Les puits (jusqu'à 90 mètres de profondeur) sont creusés par des puisatiers traditionnels sans moyens technologiques complexes ou par les techniciens spécialisés des organismes de travaux publics. Ils sont boisés ou cimentés (au moins dans leur partie supérieure) et donnent en principe de l'eau toute l'année.

Vers les années 1950-55, les campagnes de promotion de l'élevage en zone pastorale au Niger ont été accompagnées de travaux d'hydraulique importants : c'est ainsi qu'ont été forés entre 1955 et 1970 plusieurs dizaines de points d'eau dans les nappes profondes (200 mètres et davantage). Afin d'éviter la concentration précoce des troupeaux et le surpâturage, ils restent fermés pendant le début de la saison sèche. Dans la région de Teggida n Tesemt, la nappe profonde est artésienne et les forages restent ouverts jour et nuit toute l'année.

Dans la région de peuplement sédentaire on trouve peu de forages ; la plupart des villages s'alimentent aux puits traditionnels, souvent doublés de puits modernes cimentés, durables et solides sinon très riches en eau : dans de nombreux cas, le manque d'entretien réduit leur productivité.

Les régions du socle qui encadrent le bassin des Iullemmeden sont dépourvues de nappes générales. Des nappes très locales sont exploitées entre 5 et 30 mètres ; quand la pluviométrie est suffisante, des réserves sont constituées en arrière de petits barrages dans les vallées, formant des mares qui rechargent les nappes d'inféroflux.

6. PEUPLEMENT ET ACTIVITES

Au sud du 15e parallèle, la majorité de la population est constituée de groupes de tradition sédentaire pratiquant l'agriculture sèche sous pluie (mil ; mil et haricot) et, quand les conditions le permettent, du sorgho et un petit jardinage arrosé d'appoint (manioc, courges, henné, arbres fruitiers, tomates et surtout oignons). D'ouest en est, la culture de l'arachide prend de plus en plus d'importance mais depuis la sécheresse elle a régressé partout au profit des cultures vivrières.

Les populations de tradition sédentaire appartiennent à deux groupes linguistiquement et historiquement distincts : à l'ouest, les *Zarma* qui se rattachent au monde Songhay de la vallée du fleuve Niger ; à l'est, les *Hausa,* terme commode qui désigne en fait la langue commune d'un grand nombre de groupes.

Zarma et Hausa cohabitent avec un groupe de tradition nomade, souvent sédentarisé depuis un ou deux siècles dans la région, les *Peuls,* agriculteurs et éleveurs : ceux-ci entretiennent d'importants troupeaux (et prennent en charge ceux des sédentaires) qu'une partie de la famille seulement accompagne sur les pâturages du nord en saison des pluies, le reste de la main d'œuvre restant au village pour cultiver.

Dans les aires où l'espace agricole est saturé (le Dallol Boso notamment) la présence des troupeaux à proximité des champs (s'ajoutant au souvenir des guerres du siècle dernier entre Zarma et Peuls) ne va pas sans problèmes...

Deux petits cantons du Dallol Boso, celui de l'Imanan (chef-lieu Bonkoukou) et celui du Tagazar (chef-lieu Tabala), sont peuplés en majorité de Touaregs sédentarisés depuis le début du 19e siècle.

La pression des agriculteurs sur leur terroir est grande même si celui-ci n'est pas totalement mis en culture : les jachères sont de plus en plus réduites en temps et en surface ; les broussailles des plateaux constituent des pâturages de saison sèche pour les troupeaux villageois et fournissent le bois. Dans le Dallol Boso et dans le Dallol Mawri, la végétation arborée naturelle est très exploitée : le rônier pour le bois d'œuvre, le palmier doum pour la sparterie.

Sous réserve d'études fondées sur des observations et des mesures précises, on peut considérer que les dallols d'une part, l'Ader d'autre part (mais l'Ader ne fait pas partie de notre étude) sont en état de surpopulation relative.

La majorité des éleveurs est désormais refoulée au nord du 15e parallèle, dans une zone trop peu régulièrement arrosée par les pluies pour que les cultures sèches y soient pratiquées avec profit.

Eleveurs peuls et éleveurs touaregs s'y côtoient sur des aires de pâture différentes mais sur les mêmes points d'eau. Les premiers sont principalement éleveurs de bovins, secondairement d'ovins. Les seconds sont éleveurs de bovins, ovins, caprins et chameaux. Les mouvements de nomadisme ont une amplitude faible, quelques dizaines de kilomètres, rarement plus de 200 kilomètres entre les points extrêmes sauf cas particulier (sécheresse ou au contraire pâturages particulièrement prometteurs). Les Peuls fréquentent couramment la zone sédentaire en faisant pâturer, dès récolte faite, sur les chaumes. Ils parcourent des distances souvent plus grandes que les Touaregs et prennent davantage de risques en allant chercher, loin au nord, des pâturages libres : les Bororo sont nombreux depuis une vingtaine d'années dans la région d'Agadez et il n'est plus rare désormais de rencontrer des troupeaux de bovins à la latitude d'In Abangharit (observations de 1979, 1980, 1982, 1984).

Le monde pastoral exerce une pression nuancée sur son espace : les régions où les forages pastoraux sont nombreux sont fréquentées assidûment, ce qui entraîne la consommation précoce des pâturages des environs mais ailleurs, il semble que les tapis végétaux puissent se régénérer sans trop de problèmes, du moins pour l'instant et dans des conditions pluviométriques « normales ». Néanmoins, les troupeaux tendent à croître de façon démesurée et inquiétante grâce à l'apparition de sources de revenus non pastorales : les nomades, les Touaregs surtout, s'enrôlent volontiers sur les grands chantiers du département d'Agadez (route transsaharienne, prospections minières et villes nouvelles de l'uranium et du lignite : Agadez, Anu Araren, Imuraren, Arlit...). Les salaires sont capitalisés en bétail et permettent l'embauche de bergers.

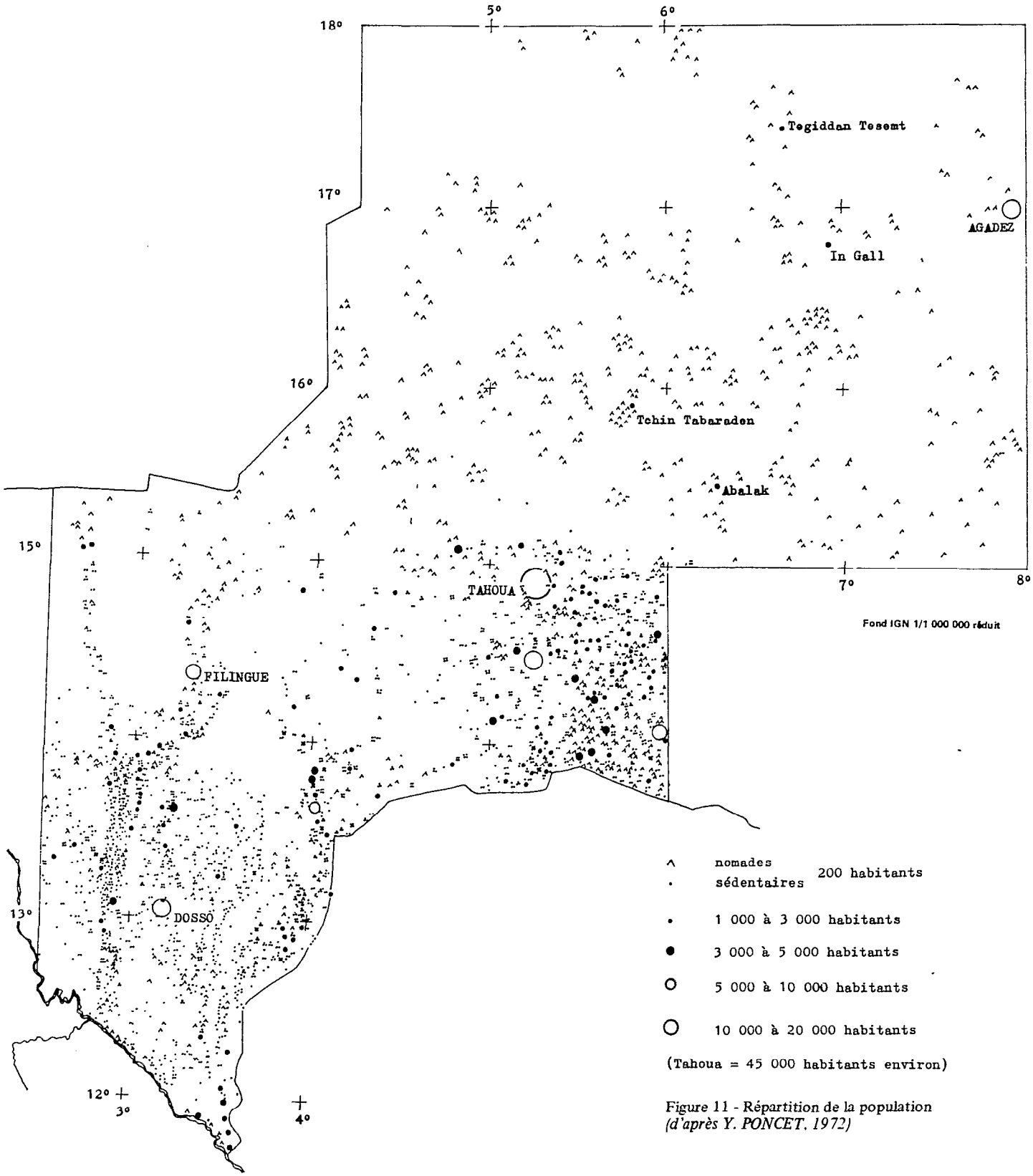


Figure 11 - Répartition de la population
(d'après Y. PONCET, 1972)

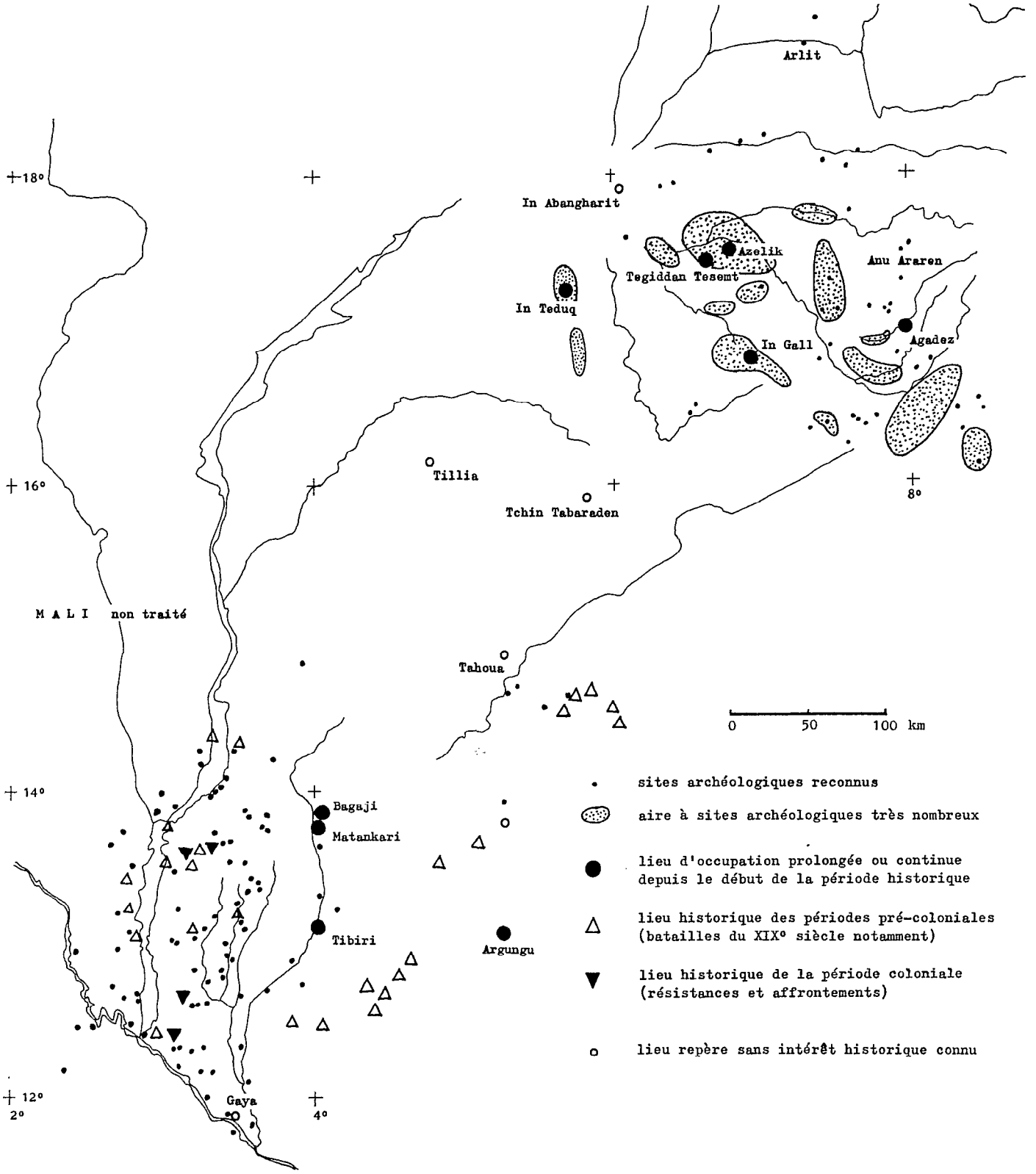


Figure 12 - Histoire et préhistoire
(d'après Boubé GADO, Djibo HAMANI, Mahmane KARIMOU, Idrissa KIMBA et les travaux du Programme Archéologique d'Urgence)

Ces troupeaux sont rentabilisés par une forte demande de bêtes sur pied et de viande de la part du Nigeria (cent millions de consommateurs...) et de la Libye. Sous un certain angle, on peut considérer que la catastrophique année 1984 a joué un rôle régulateur.

Les travaux historiques et archéologiques systématiques commencent à prendre de l'ampleur et à donner des résultats. La carte (figure 12) montre la répartition des sites historiques et archéologiques identifiés, au nord et au sud du bassin de l'Azawagh : les blancs de la carte ne sont évidemment significatifs que de l'absence de prospections et non pas de l'absence de vestiges...

Deuxième partie

LES OUTILS DE LA SPATIALISATION ET LEUR UTILISATION

L'opération d'aide à l'archéologie exigeait que l'information acquise soit rendue disponible sous forme cartographique ; ceci impliquait que les connaissances préalables soient formulées en termes spatialisés, en termes de localisation et d'identification d'unités de territoire, homogènes et classées.

Les documents rédigés et les cartes d'inventaire général pouvaient fournir des compléments, des nuances, des mises à jour, non des bases de délimitation et de classification : il fallait donc chercher les documents susceptibles de fournir ces bases : cartes thématiques et cartes topographiques ; documents de la télédétection : photographies aériennes et données de télédétection spatiale.

Comme les cartes existantes et les photographies aériennes se sont révélées les unes insuffisantes, les autres trop lourdes à exploiter, c'est l'outil nouveau et séduisant que sont les données de télédétection spatiale des satellites Landsat, Météosat et Spot (1) qui a suscité notre intérêt. L'exploration de cet outil suscitait d'ailleurs auprès des autorités locales, nationales et internationales, de grands espoirs relatifs à la solution de problèmes économiques (2).

L'étude régionale d'intérêt archéologique a été effectuée avec comme point d'appui principal les données des satellites Landsat 1 et 2 (3), lesquelles ont paru particulièrement bien adaptées à l'objectif. L'utilisation des données Landsat a été expérimentée d'abord sur le bassin de l'Eghazer wan Agadez, région d'extension limitée mais plus précisément étudiée sur le terrain. Dans un deuxième temps, elle a été étendue à l'ensemble des pays de l'Azawagh et des Dallols.

On a examiné ensuite dans quelle mesure pouvaient être utiles d'autres données de télédétection spatiale : Météosat présente, sur chaque enregistrement, la région toute entière, de l'Aïr au fleuve Niger ; au contraire, la simulation Spot propose, avec une bonne définition, l'image d'un tout petit secteur dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez.

1. LES SOURCES D'INFORMATION

Les documents ne manquent pas sur les pays de l'Azawagh et des Dallols : selon les régions et les sujets d'intérêt, ils sont plus ou moins abondants, plus ou moins utilisables. La plupart sont partiels ou ponctuels, orientés sur une aire géographique précise ou un thème spécialisé.

1.1. LES CARTES THEMATIQUES

Les restitutions cartographiques fournissent en principe une information *homogène* et *systématique.*

Seuls les documents cartographiques d'intérêt géologique et hydrogéologique couvrent la totalité ou la quasi-totalité des deux états concernés : la *carte géologique de la République du Niger* à 1/2 000 000 (Greigert et Pougnet 1965, notice 1967), l'*essai de carte hydrogéologique du Niger* à 1/1 000 000 (Greigert (4)), qui ne traite pas les régions situées au nord du 18e parallèle, la *carte géologique du Mali* à 1/1 250 000 (1981). Les deux premiers ont servi de base pour la rédaction d'autres documents cartographiques plus récents aux échelles petites et moyennes.

---

(1) Sous forme de *simulations* actuellement (1985).

(2) Dans la mesure où l'on considérait que certains problèmes de développement sont liés à une information insuffisante dans le domaine agriculture-élevage sur les territoires considérés, surtout à un moment où la grande sécheresse sévissait sur le Sahel.

(3) Les caractéristiques des données des satellites Landsat 1 et Landsat 2 étant identiques, nous ne différencions pas ici les 2 capteurs. Les données du satellite Landsat 3, s'il en existe sur l'Azawagh, n'ont pas été disponibles. Landsat 4 et 5 n'étaient pas lancés au moment de cette étude.

(4) Document non daté, rédigé en 1965 vraisemblablement.

La plupart des autres documents de cartographie thématique couvrent une zone ou une région d'extension limitée. Ils ont été rédigés soit pour répondre au besoin d'informations précises dans le cadre d'opérations de développement, soit pour dresser des inventaires thématiques. C'est le cas des travaux de recherche et de cartographie effectués en vue de la modernisation de la zone pastorale du Niger par l'IEMVT et le service nigérien de l'Elevage (étude agrostologique à 1/2 000 000, 1972) et par le BRGM (étude hydrogéologique et atlas à 1/200 000, 1970, par Greigert et Sauvel). Ces études couvrent la zone de plus grande densité de l'élevage pastoral, entre le 15e et le 18e parallèle dans l'ouest du Niger, entre le 14e et le 16e dans l'est.

La *carte pédologique de reconnaissance de la République du Niger* à 1/500 000 (ORSTOM, 1967) couvre l'ensemble de la zone sédentaire au sud du 15e parallèle.

Les cartes « locales » présentent des informations d'inventaire sur des secteurs restreints, quelques degrés carrés au maximum. Les thèmes traités sont les mêmes que précédemment mais les échelles sont plus grandes (1/500 000, 1/200 000), fournissent davantage de détails et mettent en évidence la spécificité de l'aire traitée : cartes géologiques de la bordure de l'Aïr à 1/500 000 (Joulia, 1967) et à 1/200 000 (CEA, 1978)... Il existe évidemment sur le Niger et le Mali d'autres documents, généraux ou partiels, dérivés des publications ci-dessus.

Ces travaux sont indispensables à l'approche régionale ; ils présentent toutefois des défauts et des limites qui en réduisent l'usage.

Lacunes géographiques d'abord : les territoires non traités par les cartes de base ne sont traités par aucune autre source utilisable ou disponible. C'est ainsi qu'on ne dispose d'aucune information cartographique générale sur la végétation au sud du 15e parallèle ; qu'on n'a pratiquement pas de données cartographiques thématiques sur la partie orientale du Mali...

Lacunes de contenu ensuite : les cartes géologiques du CEA et leurs notices sont détaillées mais elles se réfèrent à une toponymie hétéroclite, pas toujours facile à identifier... Certains aspects des thèmes abordés peuvent manquer : c'est le cas, nous l'avons vu, des cartes géologiques qui n'abordent que très succinctement les épisodes du Quaternaire.

Enfin, le principal défaut de ces cartes (qui ne sont certes pas chargées de donner *toutes les réponses à tous* les utilisateurs potentiels) est qu'elles présentent des unités spatiales et thématiques résultant des choix et des classifications de leurs auteurs, choix et classifications qui ne sont pas nécessairement ceux du géographe confronté à la nécessité de décrire et d'analyser les éléments du paysage.

Or aucun de ces documents ne permet de se faire une idée des paysages, encore moins de les analyser en termes de genèse et de systèmes. Ceci dit, certaines cartes thématiques ont été abondamment utilisées pour donner des repères à l'interprétation des images Landsat ; cela a particulièrement été le cas des cartes géologiques (bien que les données Landsat de la région ne restituent pas aisément les « objets géologiques ») : tel « objet » de l'image pouvait être identifié comme appartenant à l'aire « des calcaires blancs du Cénomanien » (par exemple) ; première classification image/terrain, bien que l'on ne puisse dire à ce niveau quel thème était ainsi différencié de ses voisins (végétation spécifique ? roche nue ? altérations particulières en surface ?) ...

En revanche, la carte des pâturages (*esquisse des pâturages,* 1/2 000 000, 1971) fondée sur une classification par espèces dominantes et qualité fourragère (introduisant la notion de *valeur*) est à peu près inutilisable car trop synthétique : les unités figurées et leur classement sont le produit du croisement de plusieurs niveaux d'information dans lesquels on ne retrouve pas *les unités du paysage végétal.*

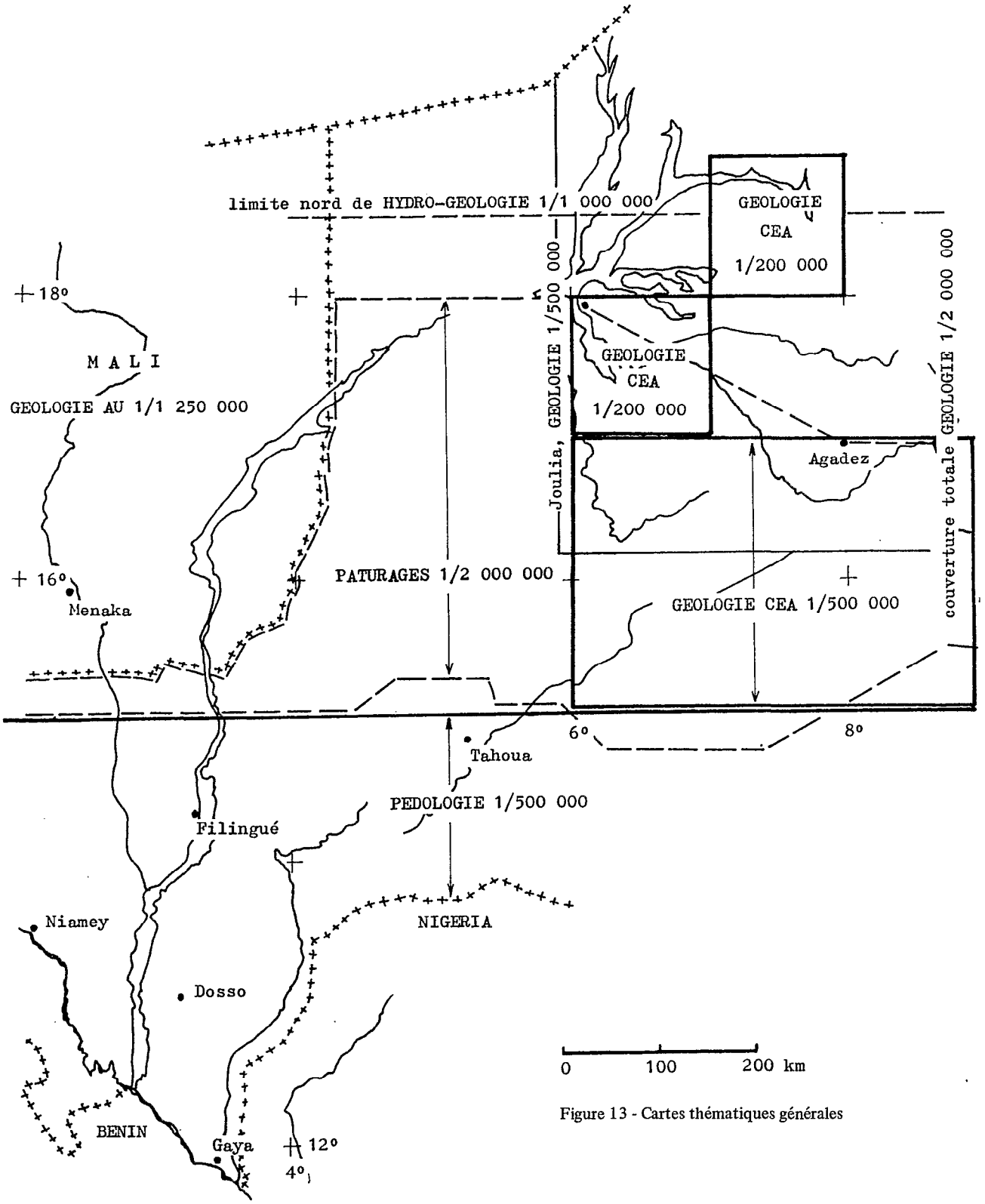


Figure 13 - Cartes thématiques générales

1.2 LES CARTES TOPOGRAPHIQUES

L'ensemble de la République du Niger et de la République du Mali est couvert, comme la plupart des autres états de l'ancienne Communauté Française, par des couvertures topographiques aux échelles petites et moyennes dressées par l'Institut Géographique National (France) entre 1959 et 1978 à partir de photographies aériennes prises entre 1955 et 1963.

Les cartes de la République du Niger et de la République du Mali à 1/2 500 000 couvrent la totalité des territoires nationaux dans un format maniable. Cartes routières et administratives plutôt que précisément topographiques, elles fournissent surtout des tracés hydrographiques présumés exacts (pas toujours), sur l'ensemble des bassins.

La *Carte Internationale du Monde* à 1/1 000 000 offre peu de précision, orographique et hydrographique. Comme elle est relativement ancienne (les planches qui nous intéressent datent de 1961 et 1963), routes, puits, lieux habités ne sont guère à jour et nous l'avons fort peu utilisée.

Plus récente, la carte topographique à 1/500 000, dressée par généralisation et mise à jour de la carte à 1/200 000, est un outil précieux. La toponymie est abondante, hydrographie et orographie y sont aussi précises et soignées que possible compte-tenu de la généralisation ; des indications sur le paysage sont souvent portées (sables, rochers, type de végétation), sur les communications (zones inondables, viabilité des pistes), sur les équipements des localités rencontrées (postaux, sanitaires, scolaires). Son échelle rend cette carte extrêmement utile pour tout travail régional. Malheureusement, les planches publiées ne couvrent pas la totalité du territoire qui nous intéresse.

La carte topographique à 1/200 000 sert de base à tous les travaux géographiques. C'est aussi la couverture systématique à la plus grande échelle couvrant l'ensemble des pays de l'Afrique de l'Ouest anciennement français.

Le soin apporté au graphisme et à l'impression, sans parler de l'échelle, en fait un outil de travail fondamental et irremplaçable : nous n'allons pas faire ici l'éloge des cartes topographiques et de leur utilité pour le géographe... Il convient par contre d'attirer l'attention sur les défauts de cette couverture cartographique afin que soit rendu compréhensible le recours à la télédétection spatiale.

Sur les pays de l'Azawagh et des Dallols, les cartes topographiques à 1/200 000 de l'IGN appartiennent à plusieurs phases de conception et de réalisation.

— Les cartes dressées avant 1960, soit quatre coupures (*Agadès* (1), *In Gall, Teguidda in Tessoum, Teguidda in Tagaît*) qui couvrent précisément le bassin de l'Eghazer wan Agadez. Ces cartes ont certainement été hâtivement rédigées (bien que sur des bases sûres : les photographies aériennes) ; erreurs d'interprétation sur les formations de surface, tracés hydrographiques plutôt vagues, fantaisie dans la position de certains puits... en font des documents peu fiables, utilisables certes, mais avec précautions . En outre, l'espacement des courbes de niveau (50 mètres) sur ce terrain peu accidenté ne rend pas compte du relief réel et la figuration des escarpements, talus et rochers procède d'une classification pour le moins incertaine...

— Entre 1960 et 1964 ont été dressées sur le sud du Niger (à l'exception des feuilles *Dosso, Niamey, Sabongari* et *Kirtachi*) des cartes topographiques précises et détaillées portant des indications nombreuses, notamment sur la végétation, le relief, l'occupation humaine et la toponymie.

— Après 1970 a été commencée ou complétée la cartographie systématique des régions sahariennes et sub-sahariennes, type « régions désertiques ». Un soin particulier a été apporté à la figuration du relief et des formations de surface (rochers, dunes...), s'ajoutant à quelques indications sur la végétation (arborée, steppique...) sans oublier les « zones inondables » (?) c'est-à-dire les aires argileuses et les bas-fonds, qu'il n'est pas sans intérêt de connaître quand on veut circuler en automobile en saison des pluies !

---

(1) La transcription des noms de lieux identifiant chaque coupure est ici *celle de la nomenclature de l'IGN* et non pas celle que nous-mêmes avons adoptée.

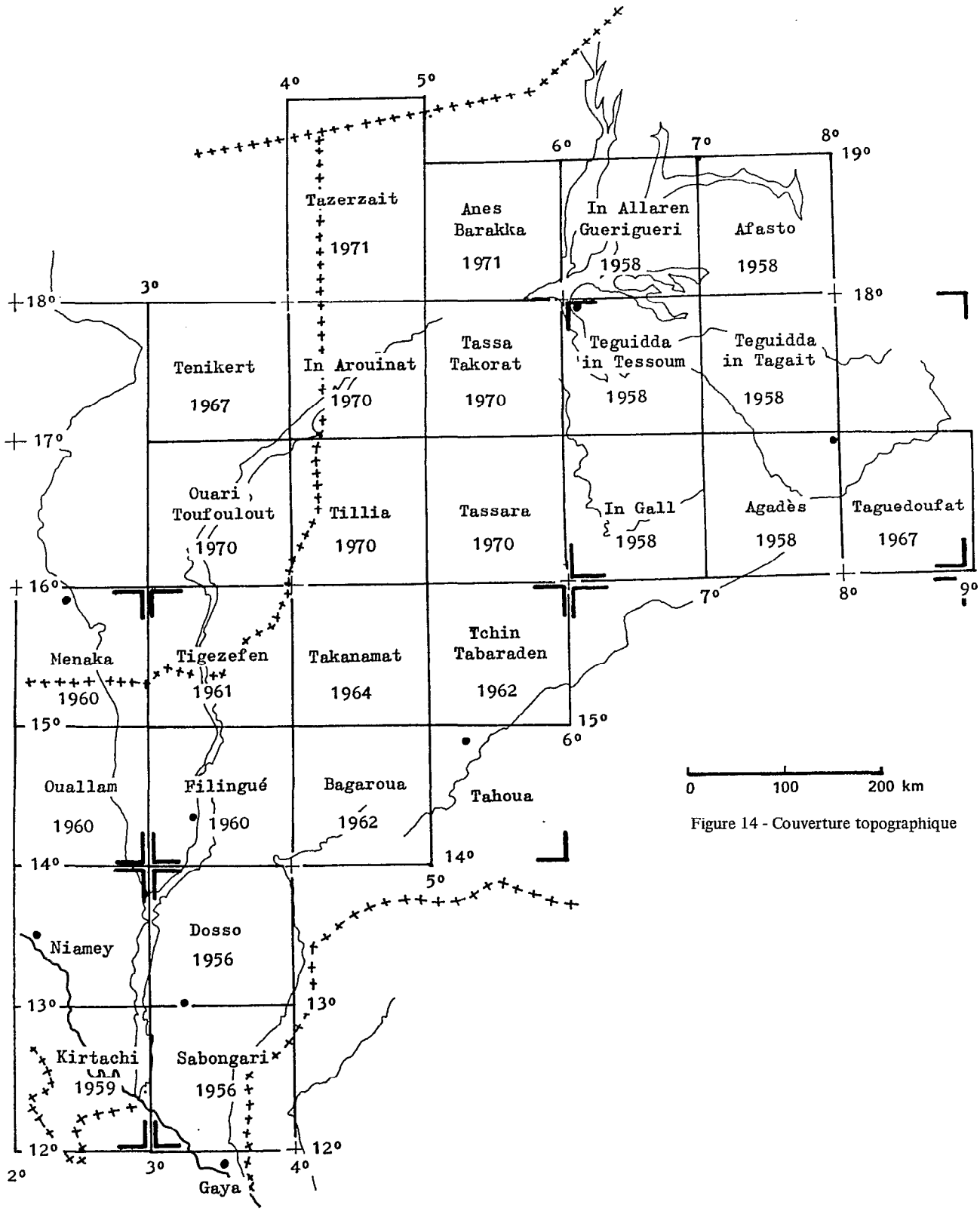


Figure 14 - Couverture topographique

Cependant, la plupart d'entre ces cartes présentent deux inconvénients non négligeables :

— de nombreuses indications, en particulier celles qui concernent les interventions humaines (routes, lieux habités, aires cultivées) sont désormais périmées ;

— la toponymie y est souvent fantaisiste, surtout dans les régions sub-sahariennes ; son abondance masque son imprécision et une inexactitude fréquente. On pourrait considérer que la toponymie importe peu au géographe « physicien » plus préoccupé de milieux naturels que d'empreinte humaine... En fait, la toponymie fait très souvent appel à des caractéristiques essentielles du paysage naturel : dunes, couleur des regs, espèces végétales remarquables, faune... En outre, « la géographie des habitants », la perception qu'ils ont de leur territoire s'appuie sur les lieux-dits qui doivent être clairement identifiés : le géographe ne peut se passer de cette *géographie vernaculaire* qui interprète et analyse l'environnement familier.

Plus que les cartes thématiques, les cartes topographiques donnent une idée du *paysage ;* associées aux cartes thématiques, elles offrent quelques éléments d'explication des formes et des situations. Mais à 1/200 000, ces éléments sont insuffisants faute de détails.

1.3 LES PHOTOGRAPHIES AERIENNES

Les cartes topographiques à 1/200 000 sont directement issues des couvertures systématiques de photographies aériennes stéréoscopiques. Dans les pays de l'Azawagh, ces couvertures ont été effectuées à des dates différentes avec des caractéristiques techniques différentes.

La couverture de base, qui a servi à la rédaction des cartes topographiques a été réalisée entre 1955 et 1959 au format 18 x 18 cm, aux échelles 1/70 000 et 1/50 000. Les contrastes et la définition sont quelquefois médiocres et on comprend que les cartes qui en sont issues portent quelques inexactitudes... La plupart de ces clichés sont difficilement utilisables pour un travail d'interprétation fine sauf dans les régions présentant des unités contrastées ; or, dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez, justement, les paysages sont fort peu contrastés... L'apport des photographies aériennes, utile en ce qui concerne les détails du relief et certains aspects hydrographiques, n'a pas paru suffisant pour justifier l'achat de plusieurs milliers de couples stéréoscopiques, sans parler des délais nécessaires à leur exploitation systématique...

Sur certains secteurs de la région, des couvertures aériennes d'extension limitée ont été effectuées pour les besoins d'opérations de développement agricole, pastoral ou minier. Entre autres, une mission aérienne existe sur tout le sud du Niger à 1/60 000 (1975) ; en 1980, une couverture à 1/50 000 a été réalisée sur une partie de la bordure de l'Aïr ; enfin, existe la couverture ponctuelle de la société de prospection minière IRSA sur la région de Teggida n Tesemt - Azelik, à 1/25 000 et à 1/10 000 : leur excellente qualité et leur grande échelle en ont fait des documents précieux pour les études très localisées associant photographies aériennes, terrain et images Landat que nous y avons faites.

Les photographies aériennes ont été utilisées comme échantillons, associées aux études de terrain dans l'Eghazer wan Agadez, seules dans l'Azawagh proprement dit.

Enfin, il convient de citer un document utile, à mi-chemin entre la carte et la photographie aérienne : c'est une mosaïque de photographies aériennes à 1/50 000, surchargée par un figuré d'interprétation du couvert végétal en classes géomorphologiques et en espèces concernées (1). Ce document est très intéressant car il donne des clefs d'interprétation des données de télédétection tout en laissant l'utilisation largement ouverte mais il ne couvre qu'une très petite surface de notre région.

Les difficultés d'exploitation des photographies aériennes ont donc incité à se tourner dès 1976 vers les données Landsat et de tenter de travailler avec les données de la télédétection *spatiale.*

---

(1) Evolution des pâturages naturels sahéliens au sud-Tamesna, 1971, couverture aérienne par Geotechnip.

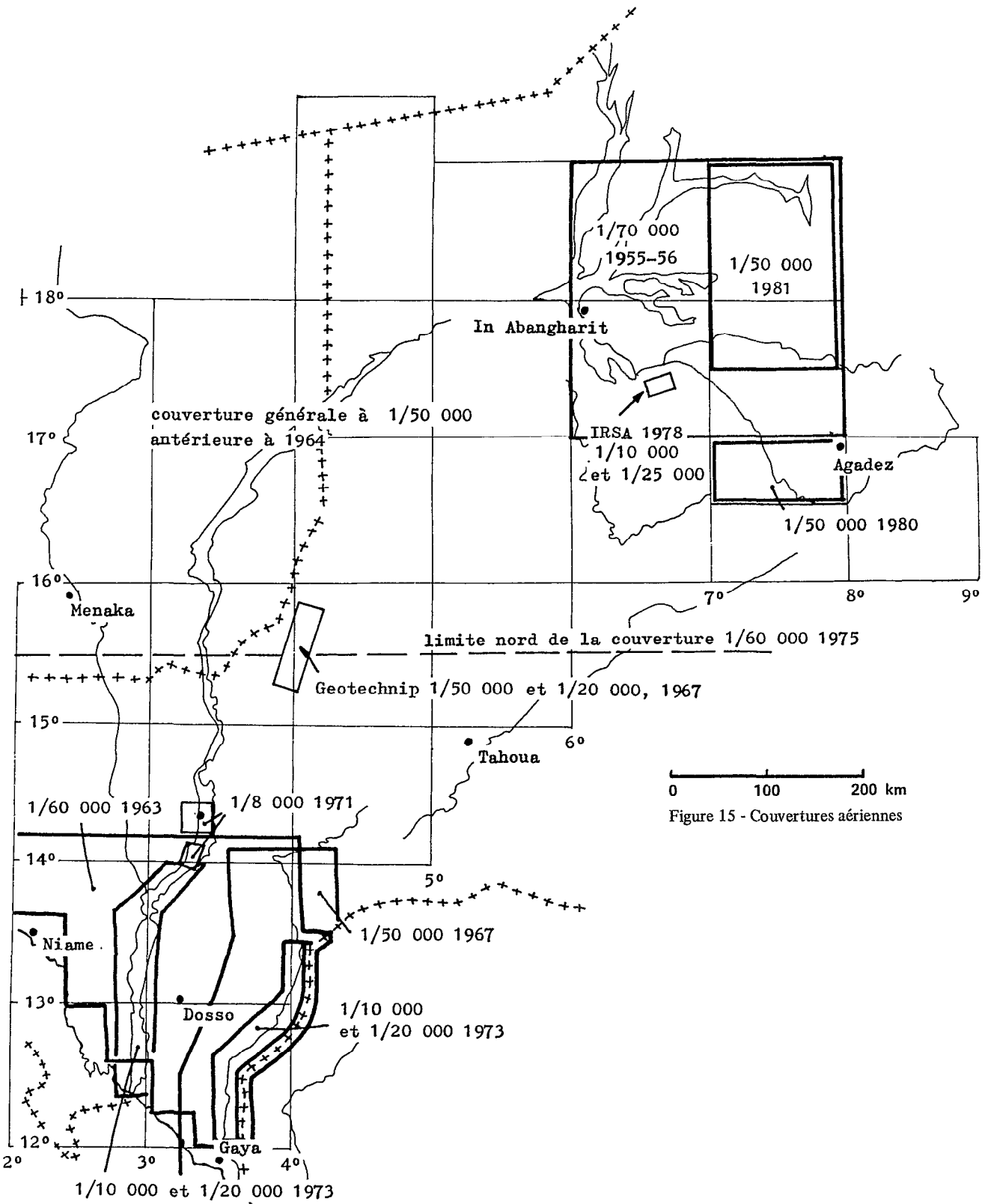


Figure 15 - Couvertures aériennes

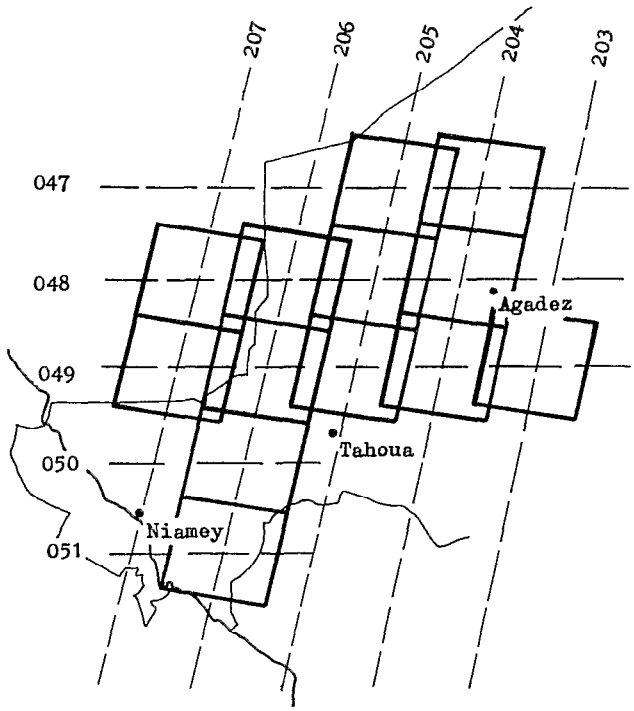


Figure 16 - Coordonnées du réseau Landsat (Landsat 1, Landsat 2 et Landsat 3)

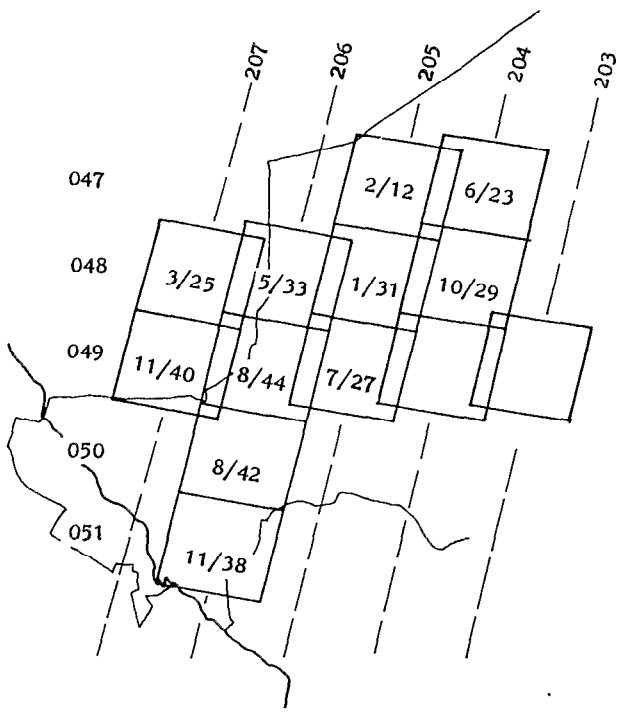


Figure 17 - Rapport entre nombre de vues présumées satisfaisantes et exploitables et nombre de vues enregistrées au catalogue USGS

0 200 km

1.4 LES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION SPATIALE

Landsat 1 et Landsat 2 ont enregistré des vues sur les pays de l'Azawagh, de façon très inégale d'ailleurs (1).

Dans la classification de l'United States Geological Survey (USGS), les territoires de l'Azawagh et des Dallols sont concernés par les coordonnées citées sur la carte ci-après (figure 16).

1.4.1. Landsat

On a donc recherché sur les catalogues des images Landsat de l'USGS les références de dates et de qualité des vues répertoriées, parmi lesquelles on a choisi celles qui avaient une qualité convenable permettant de les utiliser, entre autres, sous forme de composition colorée associant trois canaux.

Le choix a porté sur la nébulosité d'une part : on n'a retenu que les vues portant au catalogue 0 et 10 % de nébulosité ; il a porté d'autre part sur la qualité de l'enregistrement de chaque canal, évaluée en quatre classes : qualité nulle ou enregistrement nul (code 0), qualité médiocre (code 2), qualité moyenne (code 5), bonne qualité (code 8) ; nous n'avons retenu que les vues présentant une qualité *moyenne* dans deux canaux au plus et une *bonne* qualité dans deux canaux au moins.

La figure 17 donne une idée du nombre de vues présumées utilisables par rapport au nombre de vues total, sur chaque scène Landsat de notre région. Beaucoup d'enregistrements présentent un ennuagement trop important pour être retenus ; d'autres offrent une qualité d'image médiocre.

En fait, si l'on compare les qualifications fournies par le catalogue et les images elles-mêmes (leurs tirages photographiques par exemple), on constate que ces qualifications sont parfois fantaisistes : 80 % de nébulosité indiquée pour une vue qui est absolument claire (vue du 29/12/73 scène 207-048) ou bien des canaux sont dits de qualité médiocre sur des ensembles visiblement satisfaisants...

La répétitivité Landsat est, on le voit, toute théorique sur les pays du Sahel : la scène la plus « riche », avec 40 vues au catalogue en 10 ans n'en propose donc en moyenne que quatre par an ; sur ces 40 vues, 11 paraissent réellement utilisables, soit une par an en moyenne.

Le tableau de la figure 18 montre la répartition annuelle et mensuelle des vues décrites et retenues comme de qualité satisfaisante : on remarque tout d'abord qu'aucun enregistrement réussi n'a été effectué en 1974 ni en 1977. L'année 1976 a fourni le plus grand nombre de vues, toutes enregistrées entre janvier et mars, c'est-à-dire sur une période très courte. Vient ensuite l'année 1973, plus largement représentée entre avril et décembre ; puis 1975 dont les vues sont réparties tout le long de l'année, de février à décembre. Loin derrière viennent 1972 et 1978, cette dernière année ne concernant que quelques scènes et une période de quelques semaines : août et septembre.

1.4.2. Météosat et Spot

Alors que les enregistrements et les restitutions Landsat sont soumis à la périodicité du passage des satellites au dessus de l'aire concernée, à l'état de l'atmosphère, aux « caprices » du satellite, des capteurs et de sa « mémoire », les enregistrements de Météosat, satellite géostationnaire, sont d'une périodicité absolument régulière. Depuis fin 1977, date du lancement, ils sont si nombreux (le satellite envoie des informations sur l'hémisphère entier toutes les demi-heures) qu'il n'était pas question de travailler sur leur totalité. Les enregistrements ont donc été triés selon leur intérêt pour notre propos et nous avons sélectionné quatre vues du canal visible exploitable sous forme photographique.

---

(1) Il existe des vues Skylab – que nous n'avons pas vues – sur le massif de l'Aïr (information orale citée par P. Launey, géologue), des scènes Radar enregistrées par la navette Columbia (mission SIR A) sur des aires maliennes voisines et un enregistrement Landsat 3 sur l'Azawagh central (Août 1983).

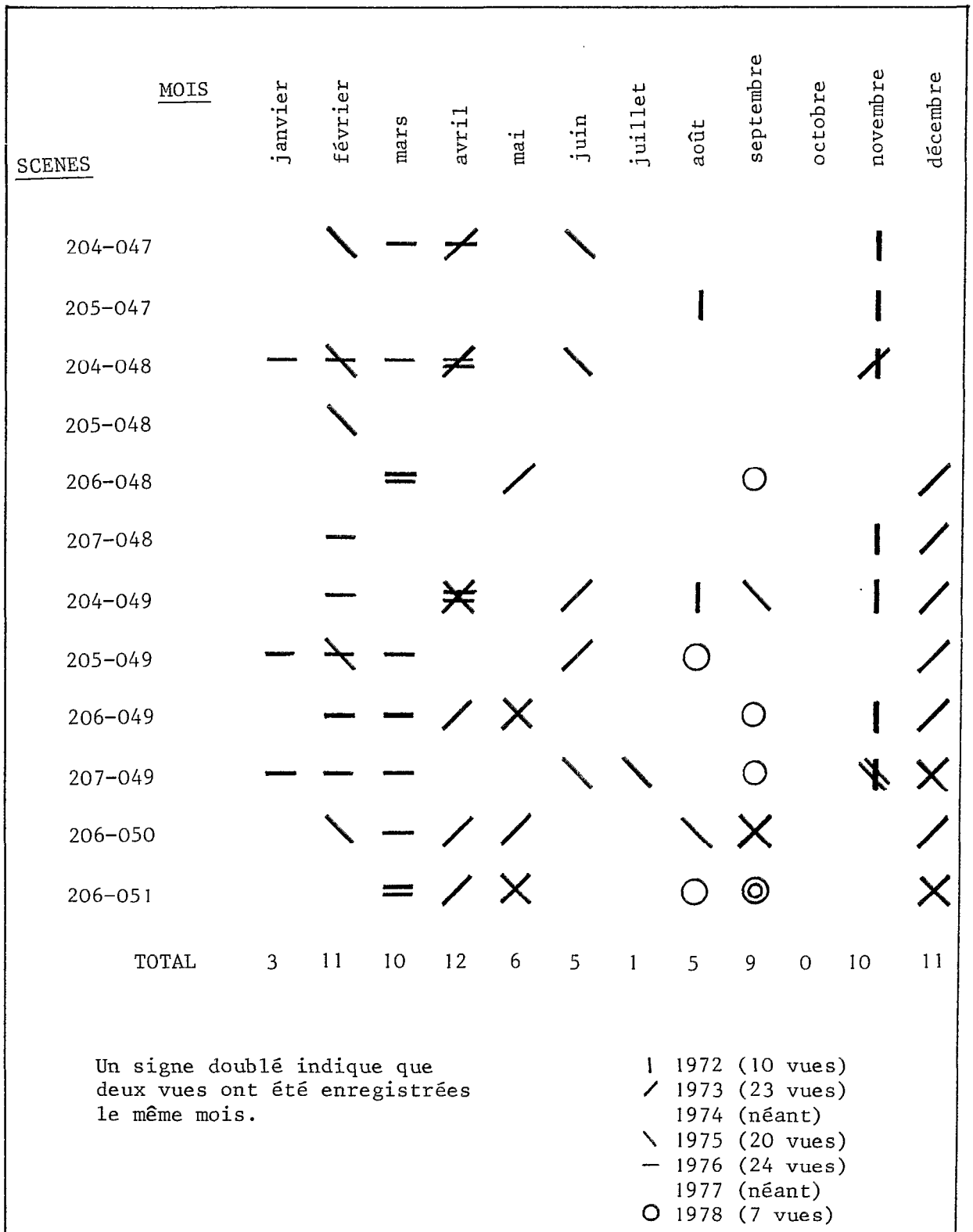


Figure 18 - Disponibilité des vues Landsat 1 et 2 pour les scènes intéressant les régions de l'Azawagh et des Dallols

Le satellite Spot n'est pas encore lancé au moment où nous écrivons ces lignes mais des *simulations* aéroportées ont été effectuées dans plusieurs régions d'Afrique, notamment dans la région d'Agadez.

Une bande longue de 24 km et large de 10 a été enregistrée au sud de la ville, le long de la route conduisant à Zinder. Malgré la très faible surface représentée, cette documentation donne quelque idée de ce que seront ultérieurement les données Spot et elle permet des comparaisons avec les données Landsat et les photographies aériennes sur le même territoire.

Les données spatiales présentent une image de la surface de la terre qui, jusqu'il y a peu de temps, n'était ni familière ni aisément lisible... Cette absence de familiarité, mais aussi la richesse potentielle de leur contenu en font des sources d'information d'autant plus séduisantes qu'il est nécessaire de les « décrypter » et d'aborder le territoire (le *terrain*) sous un angle nouveau pour les utiliser...

Dans l'étude des pays de l'Azawagh et des dallols, les données de télédétection spatiale ont été utilisées de préférence à toute autre source d'information, de façon prioritaire et même quasi-exclusive; les données « classiques » de l'information ont alors été des compléments, éléments de vérification et de validation de l'usage que nous avons fait de l'outil « spatial ».

Les conditions globales de la recherche décrite ici impliquaient rapidité et efficacité sur de vastes territoires mal connus et peu décrits dans le détail ; elles ont favorisé l'exploration de cet outil nouveau et ont offert la possibilité de le tester dans des conditions opérationnelles réelles. Les objectifs thématiques étaient certes peu définis au départ mais les qualités de l'outil lui-même ont contribué à les préciser au fur et à mesure que la « lecture » progressait et que progressait la familiarité avec la richesse, les lacunes et les contraintes de la télédétection spatiale.

2. L'ETUDE DU BASSIN DE L'EGHAZER WAN AGADEZ

C'est dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez, entre In Gall et Tegidda n Tesemt principalement, que se sont déroulées les opérations de prospection archéologique les plus soigneuses et que se situent la plupart des grands sites complexes (Azelik, Chin Tafidet, Tebangant...) ; grâce aux moyens logistiques disponibles, une présence sur le terrain a favorisé l'interprétation des données spatiales : l'interaction image Landsat — terrain a été pratiquée pendant plusieurs mois de saison sèche répartis sur les années 1979-80 et 1980-81.

Le bassin de l'Eghazer wan Agadez présente des caractères tout à fait remarquables qui en font une *région* à part entière et lui donnent une identité bien spécifique dans les pays de l'Azawagh.

Le bassin correspond à une dépression périphérique de type classique entre massif ancien (l'Aïr) et cuesta (la falaise de Tigidit), dépression creusée dans les terrains détritiques des *grès d'Agadez* et des *argilites de l'Eghazer* du Continental intercalaire. Les bancs durs, minces et discontinus d'argilites, de grès et de carbonates y alternent avec les bancs meubles (sables et illites) beaucoup plus épais.

Le tronc hydrographique principal bénéficie d'un très vaste bassin dont plus de la moitié en superficie se situe dans le massif montagneux (1) : si l'alimentation est désormais pauvre et irrégulière (quoique réelle chaque année) elle a été visiblement beaucoup plus abondante autrefois comme en témoignent creusements et alluvionnements intenses. La présence du massif montagneux jouant le rôle de château d'eau pendant les périodes de dessèchement a favorisé la conservation des écoulements alors que des cours d'eau plus éloignés des montagnes avaient cessé de couler.

---

(1) Ce n'est qu'à partir de la plaine de Tigerwit que le tronc principal porte le nom d'Eghazer wan Agadez ; tous les tronçons amont portent des noms différents.

La présence du massif montagneux a fait écran contre l'ensablement venant du grand flux ténéréen par l'est : contrairement à toutes les régions environnantes (le massif de l'Aïr lui-même excepté) le bassin de l'Eghazer n'est pas recouvert de sables (présumés) allogènes.

La conservation d'un réseau hydrographique actif, l'absence de couverture sableuse générale, la juxtaposition de milieux argileux et de milieux sableux (offrant des capacités opposées et complémentaires de rétention d'eau) semblent avoir fait du bassin de l'Eghazer wan Agadez un milieu particulièrement favorable à l'installation de populations sédentaires quand les conditions climatiques le permettaient, d'un peuplement devenu nomade quand les conditions climatiques se sont dégradées (1).

Les paysages du bassin de l'Eghazer sont caractérisés par ces argiles et argilites sombres, grises ou rouge foncé, « noirceur » assombrie encore par le vernis des cailloux et des roches affleurantes... Peu ou pas de végétation sur ces aires argileuses ; une platitude monotone rompue ça et là par les talus et les corniches des petits plateaux indurés par un niveau supérieur de reg. Les buttes-témoin de Teleginit, Anyokan, Azuza *(grès du Tegama)* qui dominent la plaine de plus de 40 mètres constituent les seuls repères...

Les terrains sableux offrent des paysages plus attrayants. Mise à part la formation des *grès d'Agadez*, dégradés sur place en sables, les aires sableuses se disposent à la périphérie du bassin mais influencent son évolution hydrographique (par apport d'alluvions, par interruption du cours de l'Eghazer au nord de Tegidda n Tesemt...). C'est sur les sables que pousse la végétation pérenne, herbacée et ligneuse, favorisée par la bonne infiltration de l'eau, par une moindre évaporation...

La monotonie apparente ou prétendue des paysages de l'Eghazer wan Agadez dissimule une réelle complexité des formes du relief et de leur genèse : les lambeaux de plateaux disséqués par une érosion linéaire récente, les bombements et petites buttes, les bourrelets, se disposent de façon peu claire à première vue : le réseau hydrographique actuel et subactuel les recoupe et les néglige plutôt qu'il ne les explique. La diversité des formations de surface ne simplifie rien : des kaolinites « glacées » en surface jusqu'aux cailloutis plus ou moins émoussés (et parfois très tranchants), on rencontre mille faciès intermédiaires que seules des études très attentives sur le terrain et en laboratoire permettraient d'identifier et de classer. Il est bien difficile au géographe de faire la différence, dans des terrains issus de formations détritiques remaniées depuis le Continental intercalaire, entre les formations « anciennes » (pré-quaternaires) et les formations « récentes », celles qui correspondent à la genèse des paysages actuels. Il faut néanmoins noter que des études de géomorphologie ont été effectuées dans les environs de Tegidda n Tesemt et de Teggidda n Tageyt par des compagnies de prospection uranifère : il n'a pas été possible d'en consulter les résultats. Ajoutons enfin les mirages qui, dès dix heures du matin et pendant toute la journée font miroiter le paysage tout entier, faussent les grandeurs et les distances : voilà de piètres conditions d'observation.

On va voir dans les pages suivantes que ce sont les données Landsat qui ont donné les moyens, sinon d'expliquer, du moins de reconnaître les grandes articulations de ce milieu.

2.1. LES VUES LANDSAT UTILISÉES

2.1.1. La sélection des vues exploitables

La partie « plaine » du bassin de l'Eghazer wan Agadez est couverte presque toute entière par la scène Landsat 204-048 sur laquelle le catalogue de *United States Geological Survey* offre 10 vues de qualité « satisfaisante » :

(1) cf. Bernus et Poncet, 1984.

Date	*Qualité*	*Ennuagement*
7.11.72	8858	10
18.04.73	8888	10
20.11.73	0055	0
4.02.75	8828	10
28.06.75	5888	10
12.01.76	5858	0
17.02.76	5858	0
24.03.76	8858	0
11.04.76	8888	0
29.04.76	8888	0

(Les dates en caractères gras sont celles des vues qui ont été étudiées).

Entre 1973 et 1976, qui est l'année du dernier enregistrement répertorié comme satisfaisant, les enregistrements ont été effectués principalement au cours de la saison sèche (janvier, février, mars, avril) plus deux enregistrements à d'autres périodes : l'un en juin (fin de la saison sèche ou début de la saison des pluies), l'autre en novembre (début de la saison sèche).

En tenant compte de la qualité des enregistrements nous avons sélectionné cinq vues aux périodes de l'année les plus éloignées les unes des autres pour saisir les éventuelles transformations saisonnières : janvier, avril (deux vues), juin et novembre. Le choix préférentiel des mois de novembre et juin ne propose que les seules années 1972 et 1975. Pour les autres vues, c'est l'année 1976 qui a été retenue d'une part parce qu'elle était la plus rapprochée des périodes d'observation sur le terrain (1979 à 1982) d'autre part parce que l'année 1976 est généralement considérée comme « pluviométriquement normale », c'est-à-dire qu'elle n'a été marquée par aucune anomalie exceptionnelle par excès ou par défaut. Elle pouvait donc offrir des vues présentant le milieu naturel « dans son état le plus ordinaire », si l'on peut parler ainsi d'un milieu sahélien. Les vues de novembre 1972 (après la saison très déficitaire de 1972) et de juin 1975 (après la saison déficitaire de 1974) pouvaient au contraire nous montrer le milieu dans un état exceptionnel (ou pouvant être considéré comme tel) très révélateur.

L'étude de la vue du 29 avril 1976 a été ajoutée pour compléter l'ensemble par une image de la situation « extrêmement sèche » : c'est la vue la plus tardive de saison sèche dont nous disposions puisque celle de juin 1975 semble présenter un milieu déjà humidifié par les premières pluies ou les premières nébulosités de la saison.

Toutes ces vues ont été exploitées par composition colorée photographique, au moins au début des travaux. Quand le besoin s'est fait sentir d'une exploitation plus fine et de l'utilisation des données numériques, notre choix s'est porté sur la date du 12 janvier 1976.

Cette date a été retenue plus particulièrement, outre pour les raisons ci-dessus, parce qu'elle correspond au milieu de la saison sèche c'est-à-dire à une période où le milieu végétal a déjà pris ses aspects de sécheresse (herbes jaunies, couvert annuel rétracté, activité chlorophyllienne très réduite) mais où la couverture herbacée n'est pas encore tombée en poussière et n'a pas encore été entièrement broutée. C'est aussi aux mois de décembre et janvier que nous nous trouvions sur le terrain.

Malheureusement, la vue du 12 janvier 1976 n'est pas de très bonne qualité : l'enregistrement du canal 4 est médiocre, très ligné par la défection d'un capteur sur six ce qui gène la restitution photographique et oblige à un lissage des données numériques ; le négatif photographique fourni par l'USGS est anormal : les repères des négatifs de deux canaux ne correspondent pas à ceux du troisième, les limites nord et sud sont donc complètement décalées ; enfin, malgré les demandes, il n'a jamais été possible d'obtenir le négatif du canal 6.

Les aires périphériques de la plaine de l'Eghazer wan Agadez non couvertes par la scène 204-048 ont été étudiées sur des images photographiques de vues prises à des dates variables :

- scène 204-047 (au nord) : 28 juin 1975 (humidité commencée) et 7 février 1972 (début de saison sèche) ;
- scène 205-048 (à l'ouest) : 5 février 1975 (une seule vue disponible) ;
- scène 203-049 (au sud-est) : 25 septembre 1975.

Cette dernière date a été choisie parce qu'elle présente le milieu dans son état pendant la saison des pluies (ou juste après les dernières pluies) : mares en eau, végétation dense, activité chlorophyllienne intense tout en offrant une grande netteté et une très bonne qualité ; les nuages, groupés dans un secteur limité, ne sont pas gênants.

2.1.2. Le milieu naturel correspondant à ces vues

Avant de travailler sur les images disponibles qui ont été choisies, il convient d'examiner dans quelle mesure les dates d'enregistrement ont une influence sur leur comparabilité et si chacune de ces dates reflète un milieu courant et habituel ou au contraire une situation exceptionnelle et anormale dont il faudra tenir compte. N'oublions pas que l'apparition des premières vues Landsat sur les pays du Sahel est contemporaine de la sécheresse qui a commencé entre 1969 et 1971 et qui se prolonge encore actuellement (1).

C'est la pluviométrie saisonnière qui détermine le plus largement l'état du milieu naturel pendant toute l'année suivante, d'octobre à mai ou juin. De la quantité des pluies et de leur répartition (dans le temps et dans l'espace) dépend principalement la nature du couvert végétal : si les herbacées annuelles ne peuvent accomplir normalement leur cycle, les herbacées pérennes vont dominer partout où les deux catégories auraient été normalement associées (sur les sables principalement) ; selon l'importance de l'inondation dans les bas-fonds et selon la rapidité du retrait, ce ne sont pas les mêmes espèces, le même couvert, qui sera favorisé ; dans ces régions où les pluies sont extrêmement érosives et entraînent les matériaux dans des crues brutales, les aspects hydrographiques peuvent être modifiés de même que certaines formations de surface (les sables alluvionnaires notamment) sans parler des modelés éoliens susceptibles d'être accentués en période de sécheresse prolongée...

Or, dans la plaine de l'Eghazer, les points de comparaison d'une année à l'autre manquent de précision : peu de données météorologiques (en fait, seule la station excentrée d'Agadez fonctionne en permanence) ; guère d'observations au sol concomitantes avec des relevés météorologiques et climatiques ; peu d'observations systématiques et dynamiques de l'évolution du milieu naturel...

Nous avons donc simplement recherché quelle avait pu être la quantité et si possible la qualité (date des premières pluies, répartition au cours des mois pluvieux, répartition spatiale hors des points d'observation météorologique) de la saison humide précédant les vues retenues de la scène 204-048. Malheureusement, nous ne possédons pas, pour les années postérieures à 1972, de relevés *quotidiens* des hauteurs de pluie : seuls sont disponibles les relevés *mensuels* des stations de la région (2).

En 1972 à Agadez (la première année de *sécheresse grave* dans tout le Sahel, rappelons-le, mais le déficit pluviométrique généralisé avait commencé en 1969) : quelques traces de pluie en avril, les pluies

---

(1) Depuis 1969, la plupart des stations météorologiques du Sahel attestent un déficit pluviométrique par rapport aux chiffres des décennies précédentes, de même que les stations hydrologiques attestent un déficit des débits (sur le fleuve Niger notamment). On a parlé de sécheresse catastrophique et de famine jusqu'en 1975 environ, date à partir de laquelle les économies concernées ont commencé à se rétablir en s'adaptant, sans que les conditions climatiques aient beaucoup changé ; en 1984, les situations pluviométriques et économiques se sont dégradées de nouveau.

(2) Certaines stations météorologiques sont tenues par des fonctionnaires, les instituteurs notamment, donc délaissées pendant la saison des pluies qui correspond à la période des congés annuels.

commencent en mai, s'accentuent en juin (13,4 mm) et en juillet (18,7) puis culminent en août (40,7) ce qui est un déroulement normal de la saison ; mais septembre ne reçoit que 0,9 mm, ce qui est très peu. Le total atteint 73,9 mm sur 23 jours de pluie, soit un déficit réel (1) mais comme les pluies ont commencé relativement tôt, le cycle naturel de la végétation a pu s'accomplir presque normalement. Il est probable que les troupeaux des régions plus durement touchées par l'insuffisance pluviométrique, où les pâturages ne se sont pas suffisamment renouvelés, se sont déplacés sur la région mais au mois de novembre, date de l'enregistrement Landsat, les effets d'un surpâturage ne se sont pas encore fait sentir.

A In Gall (120 kilomètres au sud-ouest) les pluies commencent tôt également : 4 mm en avril et 3,5 en juin mais ne progressent guère en juillet ni en août : 21,5 mm pour *les deux mois,* ce qui est très faible ; elles sont presque nulles en septembre : 5,0 mm. Total : 55,9 mm en 15 jours, ce qui représente le quart de la moyenne (calculée sur 18 ans : 1956-1974, 204,7 mm). 1972 est donc bien une année très déficitaire, mais inégalement. Il est probable que certaines aires de la région ont été suffisamment arrosées pour assurer la survie des espèces pérennes et le renouvellement des herbacées annuelles mais que d'autres n'ont pas reçu assez de pluie pour que le tapis herbacé ait son apparence « ordinaire ».

Pour évaluer l'état du milieu lors de la prise de vue de juin 1975, il faut tenir compte des pluies de la saison 1974 et des pluies éventuellement tombées avant le 28 juin. L'année 1974 est plus abondante que 1972 : 136, 4 mm en 23 jours à Agadez (ce qui est quasi « normal »), pas de relevé à In Gall, 88 mm en 11 jours à Arlit, ce qui serait « plutôt excédentaire » mais la station d'Arlit est trop récente pour que l'on dispose de séries pertinentes. Les premières pluies de l'année 1975 sont donc probablement tombées sur un milieu « normal ». Nous ne possédons pas pour 1975 de relevé journalier permettant d'affirmer qu'il a plu sur la région *avant* la date de l'enregistrement Landsat mais nous disposons d'un relevé hebdomadaire pour la semaine du 23 au 29 juin : il est tombé, entre ces deux dates 23,2 mm à Agadez, ce qui est important. L'examen de l'image en composition colorée montre d'une part une nébulosité notable dans le coin sud-est, ce qui permet de penser qu'il avait effectivement plu sur la région au moment de la prise de vue (28 juin) ou tout au moins que le territoire avait bénéficié des effets d'une forte humidité atmosphérique, d'autre part une forte réflectance générale dans le canal 4 ; la vue du 28 juin 1985 semble donc présenter un milieu relativement humide et une végétation pas encore active.

Les vues de 1976 (janvier et début avril) présentent le milieu en saison sèche après une saison des pluies (1975) que l'on peut considérer comme « ordinaire » : il est tombé 132 mm à Agadez, ce qui est proche de la moyenne calculée. On a vu que les pluies ont commencé tôt, elles se sont achevées à la fin de septembre, ce qui est la période normale.

En vue d'ajuster les données de l'image du 12 janvier 1976 aux données de l'observation du terrain en 1979 et 1980, nous avons tenté de faire une enquête auprès des populations rencontrées à travers toute la région sur la *qualité* de l'année pluviométrique 1975. Comme on pouvait s'y attendre et conformément aux caractéristiques zonales du climat, c'est l'irrégularité géographique qui apparaît clairement. Il a plu de façon *satisfaisante* au sud de la région d'Agadez, à l'ouest et même au nord du bassin de l'Eghazer, dans la région d'Imuraren ; par contre, il a très peu plu dans la vallée de Sekiret, où les pâturages ne se sont guère renouvelés au dire des pasteurs.

2.1.3. Les traitements photographiques

Dans le cadre du parti-pris de *simplicité* des moyens déjà cité, les vues ont toutes été traitées sous la même forme à l'échelle 1/500 000, la plus maniable compte-tenu des dimensions de l'aire à étudier et la plus courante ; c'est en outre l'échelle de restitution des travaux cartographiques effectués dans le cadre du Programme Archéologique d'Urgence.

---

(1) Agadez, pluviométrie calculée sur l'intervalle 1921-1973 : moyenne 156,2 mm ; écart à la moyenne 56,3 mm.

Les vues ont été examinées en *composition colorée* dite *standard* (normes de l'ORSTOM) associant trois canaux et les couleurs suivantes :

canal 4	jaune
canal 5	magenta (rouge)
canal 7	cyan (bleu)

Cette solution a été retenue après plusieurs essais : c'est elle qui permet de différencier le mieux des thèmes différents à réflectance basse (aires à montmorillonites et aires à regs vernis par exemple). La bonne lisibilité du canal 7 dans le cyan met en évidence deux types de repères : les axes hydrographiques et les aires de roches nues et d'éboulis vernis, très absorbants dans le canal 7.

Afin que certaines données soient immédiatement comparables (sinon superposables) aux cartes topographiques dont nous disposions, nous avons travaillé aussi sur des agrandissements à 1/200 000 de la vue du 12 janvier 1976, toujours en composition colorée. L'information ne gagne guère en précision, elle gagne en lisibilité dans certains cas : la falaise de Tigidit, certains axes hydrographiques... Mais l'expérience a montré qu'un agrandissement supérieur ne donne pas ici de résultats meilleurs.

Plusieurs gammes de compositions colorées ont été utilisées, selon que l'on souhaitait étudier plus particulièrement les périphéries de la zone des argilites (généralement claires) ou la zone des argilites elle-même (généralement sombre) en faisant varier les temps de pose afin d'obtenir les nuances les plus fines dans l'un ou l'autre secteur.

Dans certains cas et afin de délimiter certaines unités de l'image avec le maximum de précision, nous avons utilisé les tirages photographiques en noir et blanc, canal par canal, sous forme de films positifs : la finesse de restitution est nettement plus élevée que celle des compositions colorées diazoïques et les rapports de contrastes y sont plus lisibles.

2.1.4. Les exploitations numériques

La bande numérique de la vue du 12 janvier 1976 a été utilisée à plusieurs fins. Tout d'abord elle a servi pour l'initiation à la télédétection sous forme numérique, pour l'apprentissage de la manipulation du périphérique *Péricolor* et de l'utilisation des traitements élémentaires.

Elle a ensuite servi à expérimenter des modes de traitement susceptibles de *préparer* les études de terrain puis, au retour, à étudier à grande échelle et au pixel près, les zones sur lesquelles nous disposions d'une *réalité-terrain* réelle par observation directe et par photographies aériennes à grande échelle.

Enfin, elle a été exploitée pour rechercher des traitements de l'image capables de différencier des familles de thèmes en territoire peu ou mal connu.

L'image toute entière n'est pas traitée sous forme numérique ; ce sont des zones sélectionnées qui sont étudiées : la région d'Azelik, la région de Tegidda n Adrar, les environs d'In Gall et de la butte d'Anyokan, la région d'Asawas et l'*agoras* de Kerbubu.

Les traitements numériques ont utilisé principalement des programmes qui permettent une *différenciation des espaces,* traduits par des différences de valeurs radiométriques, plutôt que des programmes de traitement statistique de ces valeurs.

Les données numériques sont ainsi venues *compléter* les données photographiques Landsat : elles ont apporté sur des secteurs géographiques d'extension limitée, choisis comme échantillons, des informations précises, détaillées, chiffrées, rigoureusement comparables entre elles. Ces informations ont servi de base d'extrapolation à l'étude de la scène toute entière et même, ultérieurement, de points d'appui pour l'étude des scènes dans l'Azawagh.

2.1.5. Nous ferons ici une place à part au document « mixte » qu'est la *composition colorée améliorée* publiée par l'Institut Géographique National. Ce document (1) a été réalisé pour répondre à la demande d'une

(1) IGN-SETRA, *Agadez, esquisse topographique sur composition colorée Landsat,* 1/250 000 environ, 1980.

société d'aménagement routier, mais il a été diffusé trop tard pour que nous ayions pu réellement nous en servir dans le cadre de nos travaux.

Il se présente sous la forme d'une composition colorée standard (les correspondances canal-couleur indiquées plus haut) imprimée sur papier. La vue est celle du 12 janvier 1976, l'échelle, 1/250 000 environ. Le document porte en surcharge les coordonnées géographiques, les routes principales et une toponymie très succincte à titre de repère.

Il est établi à partir des données numériques traitées au moyen du système interactif *Trias*. Les données ont subi un pré-traitement destiné à améliorer l'image : délignage, réhaussement global des contrastes, filtrage destiné à renforcer les contours, le tout conduit sur écran de visualisation. La fabrication des documents *graphiques* d'où est issue la composition colorée est effectuée au moyen du procédé *Sémio* (1) qui permet, entre autres avantages, d'obtenir de très grands formats : le document cité a un format utile de 74 cm x 78 cm. Les trois films noir et blanc obtenus sont combinés pour obtenir la composition colorée.

L'originalité de ce document est qu'il est directement issu de la *bande numérique* et non du négatif photographique : il gagne donc en précision à une échelle où chaque pixel est rendu individuellement visible. Cette image est dite *améliorée* car les contrastes ont été renforcés partout où se trouvent juxtaposées des valeurs numériques très différentes (mais quel est le seuil de différence ?). Le résultat est un document très lisible et agréable à l'œil mais difficilement interprétable avec sûreté puisqu'il ne restitue pas réellement les nuances de valeurs radiométriques dans leurs rapports vrais.

Le Bassin de l'Eghazer wan Agadez (figure 20, page suivante)
Scène 204-048
Vue du 12.01.76
Tirage noir et blanc, canal 5,

Le « Triangle des argilites » dans lequel s'inscrit une partie importante du bassin hydrographique de l'Eghazer wan Agadez est bien visible au centre de la scène : les réflectances sont généralement basses, nettement délimitées par des aires plus claires qui sont des sables.

Au sud, le plateau de la Tadarast se termine par la falaise de Tigidit, rendue visible ici par la mince bordure noire des roches vernies et des éboulis.

Au sud-ouest, les « massifs » de la région d'In Gall (In Tazar, Izadelagan, Anasafar...) apparaissent en noir très contrastant en raison des patines recouvrant les roches dénudées et les éboulis. Cette patine et ce faciès très sombre sont caractéristiques de la formation la plus ancienne des *grès du Tégama* : on les retrouve sur les buttes-témoin d'Azuza et d'Anyokan.

Vers l'est, les argilites font contraste avec l'aire des *grès d'Agadez* recouverte de sables clairs, à laquelle succède le massif de l'Aïr, montagneux et rocheux. Les réflectances y sont généralement basses mais contrairement à la plaine des argilites, les vallées y sont inscrites en clair (alluvions sableuses) ainsi que les diaclases.

Au nord, la plaine des argilites proprement dite prend fin sur la grande vallée de Sekiret ; les argilites reparaissent, plus ou moins recouvertes de sable, au-delà.

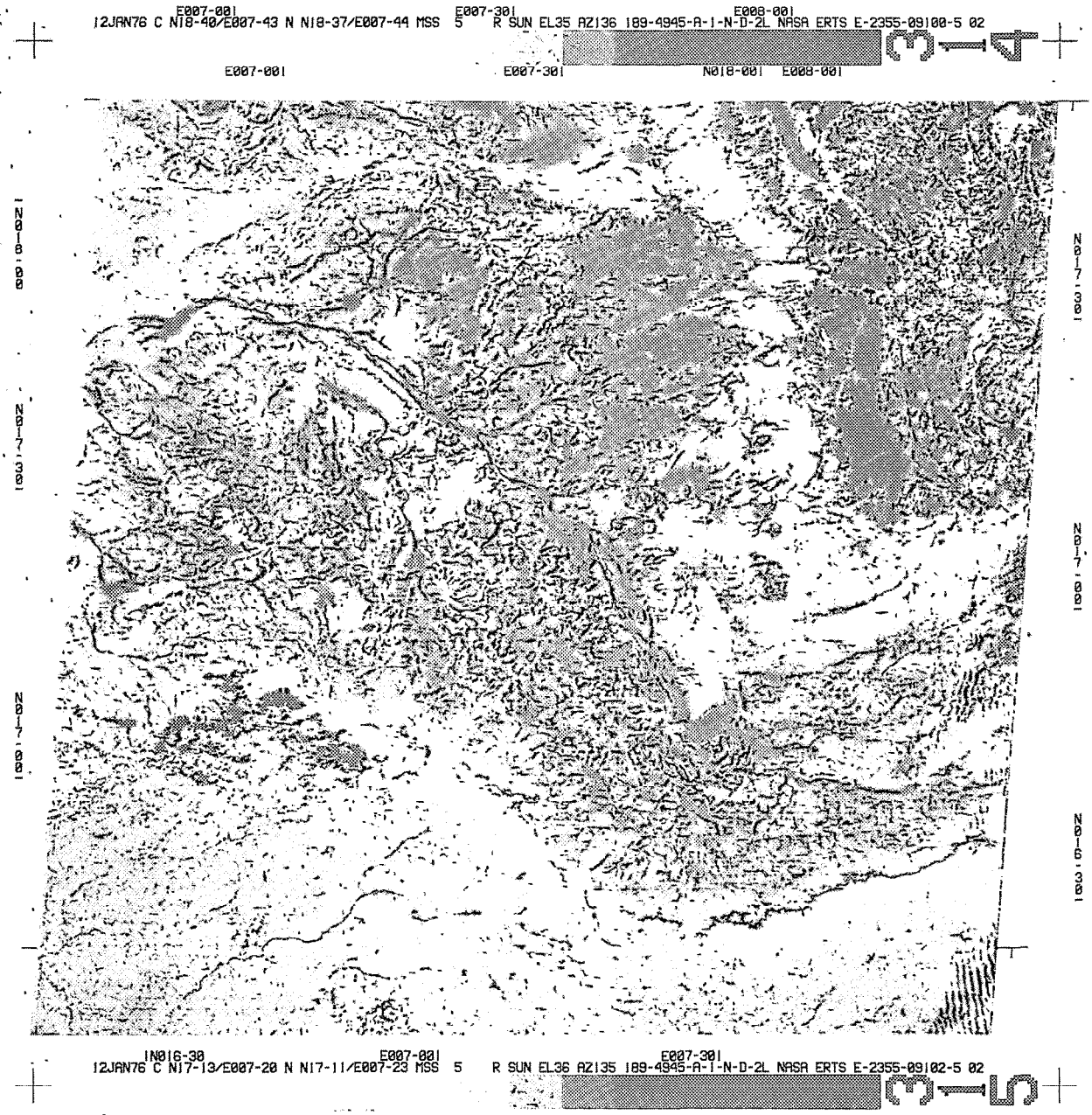
Le tronc principal de l'Eghazer wan Agadez est distinct dans une partie de son cours seulement.

A l'est d'Asawas, le compartiment soulevé et fracturé des *grès d'Agadez* est bien délimité.

Entre Tegidda n Tesemt et le site archéologique d'Azelik, on distingue nettement la « dune » claire d'Azelik, ainsi que les talwegs sableux qui se dirigent vers l'Eghazer wan Agadez. La zone en forme de delta qui se trouve au nord de Tegidda n Tesemt marque la limite des écoulements saisonniers habituels.

Sur ce document en noir et blanc du canal 5, la végétation active se distingue bien : on remarquera la mince ligne grise qui marque l'*agoras* de Kerbubu.

(1) *Trias* et *Sémio* sont des systèmes et procédés spécifiques à l'Institut Géographique National.


E007-001
E007-301
E008-001
12JAN76 C N18-40/E007-43 N N18-37/E007-44 MSS 5 R SUN EL35 AZ136 189-4945-A-1-N-D-2L NASA ERTS E-2355-09100-5 02
E007-001
E007-301
N018-001
E008-001
N018-00
N017-30
N017-00
N016-30
N017-30
N017-00
N016-30
N016-30
E007-001
E007-301
12JAN76 C N17-13/E007-20 N N17-11/E007-23 MSS 5 R SUN EL36 AZ135 189-4945-A-1-N-D-2L NASA ERTS E-2355-09102-5 02

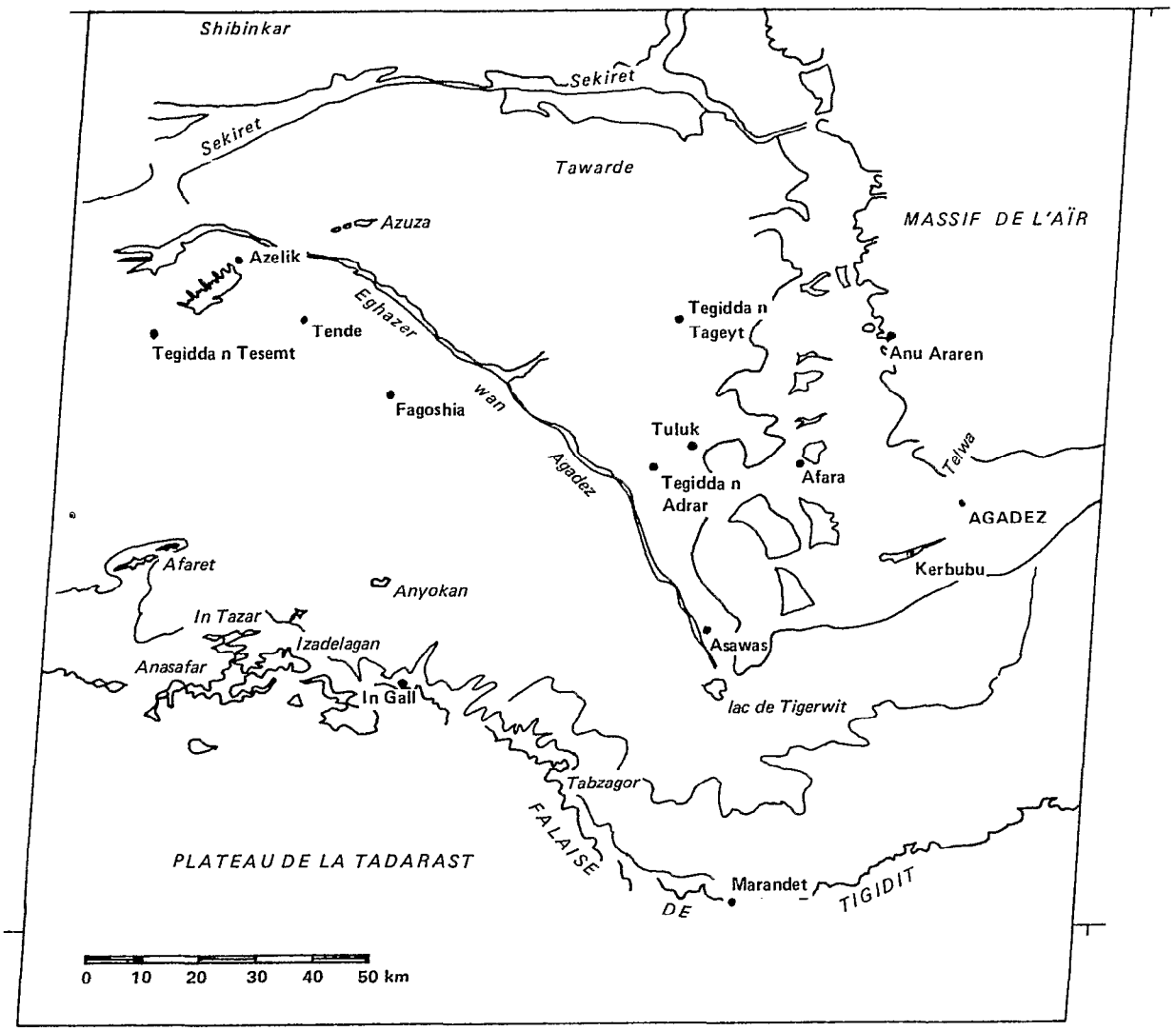


Figure 20 - Scène Landsat 204-048, repères toponymiques

2.2. L'ACQUISITION DE L'INFORMATION

2.2.1. Les problèmes à résoudre

Utiliser les images Landsat impliquait la solution des problèmes suivants :

— Identifier la correspondance entre *figuration* sur l'image (photographique et/ou numérique) et *objets* sur le terrain ;

— s'assurer de la validité de cette correspondance pour extrapoler à la fois sur le plan thématique (passer de l'*objet* au *thème*) et sur le plan spatial (identifier ailleurs la *présence* et les *limites* du thème) ;

— expérimenter l'usage d'un outil nouveau dans des conditions nouvelles et rechercher le maximum de légèreté et d'efficacité.

Identifier la correspondance entre figuration et objet ramène à une opération d'interprétation en télédétection traditionnelle à condition qu'il soit tenu compte des caractères particuliers du signal Landsat dont l'un des principaux est la taille de la tache élémentaire (79 mètres sur 56, approximativement) et, partant, de la nature composite de son contenu. L'identification de ce contenu est l'un des problèmes à résoudre afin de passer de l'*objet* au *thème*.

La validité de l'interprétation peut être assurée par la démarche inverse : ayant identifié un *thème* par son signal radiométrique, on se posera la question « ce signal caractérise-t-il ce thème et lui seul ? ». La réponse peut être trouvée en comparant entre elles des sources d'information différentes sur toute la surface de la région étudiée : cartes topographiques et thématiques, photographies aériennes, vues Landsat à des dates différentes...

La méconnaissance du terrain au tout début de l'opération d'interprétation des données Landsat n'était pas telle que des objets ne puissent être reconnus et identifiés : c'est ainsi que le cours inférieur de l'Eghazer wan Agadez est immédiatement repérable en raison de sa position dans la vue et de sa forme ; il en est de même pour la falaise de Tigidit, pour les buttes-témoin, pour les massifs rocheux de la région d'In Gall ; on dispose d'emblée d'un corpus d'informations qui permet un repérage général et des bases d'extrapolation mais ce corpus est très insuffisant :

— insuffisant en volume : on reconnaît certes quelques objets, mais ils sont peu nombreux ou bien ils couvrent une gamme de thèmes très limitée (les grandes vallées, les affleurements de *grès du Tégama*...) ;

— insuffisant en qualité thématique : on reconnaît bien le cours de l'Eghazer mais on ne sait pas *pourquoi* il se signale par des valeurs radiométriques très basses ;

— insuffisant en discrimination : on ne voit pas de différence entre la dune d'Azelik et le plateau de la Tadarast alors que leur différence d'origine géologique et lithologique suggère des paysages dissemblables, ce qui est bien la réalité.

Pour l'interprétation des données Landsat de la scène 204-048 sur la plaine de l'Eghazer wan Agadez et ses environs, on a donc mis en œuvre un mode d'interprétation de type tout à fait classique, à la fois global et analytique, qui s'est appuyé sur deux démarches : d'une part dresser un inventaire de la correspondance objet-image de nos sujets d'intérêt (formations de surface, végétation, indices hydrographiques et paléo-hydrographiques), d'autre part tenir compte de la structure du territoire pour aider à l'interprétation en s'attachant à l'examen des formes, des associations et des signaux radiométriques.

Mais l'enchaînement des opérations que nous avons mises en œuvre n'a pas découlé absolument de la logique ni d'une procédure méthodologique rigoureuse : il est le fruit d'ajustements et de solutions quelquefois empiriques appliquées à des problèmes nouveaux.

2.2.2. La préparation aux travaux sur le terrain

Les compositions colorées et la bande magnétique de la vue du 12 janvier 1976 ont été utilisées pour tenter d'acquérir des informations supplémentaires à celles que les données existantes (rapports,

documents rédigés et cartographiés, cartes topographiques) nous avaient livrées. Cette préparation était destinée :

— à donner des éléments de correction des cartes topographiques, connues pour leur insuffisance ;

— à donner des éléments de compréhension des grands types de paysage : extensions, juxtapositions, transitions...

— à rétablir les documents existants dans un contexte global et homogène, même si ce contexte n'est pas entièrement saisi en termes d'interprétation ;

— à jeter les bases d'une première interprétation des données Landsat ;

— à choisir, afin d'éviter de trop lourdes contraintes logistiques, les zones échantillons à étudier attentivement sur place.

La préparation a d'abord été faite sur composition colorée standard, et a permis de dresser le tableau provisoire et incomplet des objets identifiés et, dans certains cas, de leur correspondance thématique. Elle a donné lieu à des « cartographies provisoires », croquis thématiques figurant des unités de paysage et leur signification présumée.

A l'occasion de cette préparation, la nécessité d'une plus grande précision de lecture s'est très vite fait sentir :

— précision des valeurs radiométriques : sur l'image photographique (composition colorée ou positifs noir et blanc) les valeurs radiométriques peuvent difficilement être comparées entre elles, surtout dans les valeurs intermédiaires ; il est alors impossible de rapprocher, même hypothétiquement, les valeurs semblables d'objets semblables...

— précision des contours des objets sur l'image : sauf exceptions (le massif de l'Aïr, les massifs de la région d'In Gall, bien délimités car très contrastants avec le voisinage, la « dune » d'Azelik, de forme caractéristique et de situation connue) les basses réflectances passent aux hautes réflectances par des contours flous et des contrastes amortis ; il devient alors nécessaire de connaître dans le détail la disposition des taches élémentaires et la nature de ces transitions : gradients des valeurs radiométriques, proportion des mélanges, textures éventuelles... non discernables à l'œil sur photographie...

Il s'agit donc en fait de *changer d'échelle* d'analyse, de passer de 1/500 000 à une échelle où la tache élémentaire devient distincte, dénombrable et mesurable en valeur radiométrique, d'obtenir un zoom en quelque sorte. Seules les données numériques peuvent nous fournir cette finesse et ces valeurs ; il va sans dire que l'agrandissement n'est pas l'intérêt principal des données numériques... A cette étape du travail, il a été néanmoins un passage obligé pour le tri et le classement de l'information.

La préparation aux études de terrain sous forme numérique a été effectuée sur la région d'Azelik, dans laquelle nous prévoyions de stationner le plus longtemps au cours des missions et sur laquelle nous savions pouvoir disposer ultérieurement de photographies aériennes de bonne qualité à grande échelle (couverture IRSA à 1/25 000 et 1/10 000).

Nous y avons appliqué les programmes de visualisation les plus simples.

La *dégradation des niveaux radiométriques canal par canal* au *Péricolor* permet d'identifier les secteurs géographiques de même valeur radiométrique. Elle a été effectuée d'après les éléments structuraux visibles sur la composition colorée en prenant comme « points d'appui » géographiques et radiométriques la vallée de l'Eghazer wan Agadez (basses réflectances) et la « dune » (1) d'Azelik (hautes réflectances).

La zone se trouve au contact de deux ensembles très différents : au nord-ouest, les hautes réflectances qui correspondent à des terrains sableux ; au sud, des réflectances moyennes et basses qui corres-

(1) Par le terme « dune » employé ici à plusieurs reprises, nous entendons une unité de paysage bien définie, masse de sable en relief : *dune* (*egef* en Tamasheq) est bien le terme qui la désigne. Il ne s'agit pourtant pas d'une accumulation éolienne mais d'un bombement faillé.

pondent à la zone des argilites, bas-fonds argileux et regs ; au milieu, la masse claire du bombement d'Azelik, sableux, que nous *savons* par information préalable différent des aires sableuses précédentes ; ailleurs, des réflectances d'intensité variable, généralement moyennes, non identifiées.

A ce stade préliminaire du travail, il n'était pas possible de dire si les unités de « paysage radiométrique » correspondaient — en localisation et par leurs limites — à des unités de paysage réel : sur la base des quelques unités connues, nous en formulions l'hypothèse, sans plus.

Ces *dégradations* ont été visualisées puis matérialisées par traçages Benson dans les quatre canaux à l'échelle 1/100 000 au format 500 lignes et 500 colonnes, soit environ 39,5 km x 28,5 km. Ces « cartes de radiométrie » ont été tracées pour être utilisées et vérifiées sur le terrain.

A partir des dégradations canal par canal, il était tentant d'expérimenter l'intérêt d'un traitement combinant les canaux deux à deux : nous avons donc utilisé le programme *LOTERIE* de l'ORSTOM, en combinant les canaux 5 et 6 puis 4 et 6, dont on attendait des informations fines sur la végétation et les argiles nues.

2.2.3. Les travaux sur le terrain

Sur le terrain, les images Landsat sous forme de compositions colorées à 1/200 000 (la même échelle que les cartes topographiques), de tirages noir et blanc sur papier à 1/200 000 et de traçages issus des manipulations numériques, ont été utilisées à deux fins :

— comme « carte radiométrique » qu'il s'agissait d'interpréter, dont il s'agissait en fait d'*écrire la légende* ;

— comme carte topographique susceptible d'indiquer au « voyageur » (au chauffeur plus précisément) les secteurs aisément parcourables en automobile tous-terrains et les secteurs à éviter.

Les travaux d'interprétation image Landsat — terrain, assistés par l'étude des photographies aériennes, sont évidemment les plus importants : ce sont eux qui ont eu pour résultat l'inventaire de la plupart des *clés d'interprétation*.

On a d'abord recherché l'interprétation des unités radiométriques de réflectance extrême : en premier lieu les plus basses, très contrastantes par rapport à leur voisinage et aisément repérables sur le terrain ; les réflectances les plus élevées ensuite, généralement moins nettement contrastées mais toujours bien délimitées. Les réflectances intermédiaires n'ont été examinées qu'en dernier lieu, avec beaucoup plus de difficultés quant au repérage des unités concernées sur le terrain.

Le bassin de l'Eghazer a été étudié le long de deux axes principaux : un axe nord-sud qui part de la région de Shibinkar (au nord de la vallée de Sekiret) dans les sables de recouvrement et finit dans la région d'In Gall, sur la falaise de Tigidit, après avoir traversé de nombreux faciès de la formation des *argilites de l'Eghazer* ; un axe est-ouest qui commence sur les collines de Tawarde et finit à Teggida n Tesemt, c'est-à-dire se situe tout entier dans la plaine des argilites et passe sur la butte d'Azuza et le bombement d'Azelik.

Ces axes ont été parcourus, photographiés et chaque changement de paysage a été noté et reporté à l'image Landsat.

Les *faciès radiométriques* ont été mis en relation avec les unités de paysage sur le terrain, visibles et identifiables depuis le sol et les unités de paysage discernables sur photographies aériennes. Cette mise en correspondance triple a permis d'identifier et de classer un certain nombre de types de correspondances images — terrain, plus ou moins assurées, plus ou moins affinées, puis de rechercher les causes d'anomalies radiométriques que la familiarité avec l'ensemble image spatiale — photographie aérienne — terrain avait permis de repérer. Elle a permis par ailleurs d'utiliser très vite les données photographiques Landsat comme de véritables cartes routières, comme une figuration des obstacles à la circulation automobile et à l'intégrité mécanique par reconnaissance des regs à cailloux tranchants, des aires à montmorillonites et des fourrés à épineux, économisant ainsi les pneus, la suspension et la bâche de notre unique véhicule.

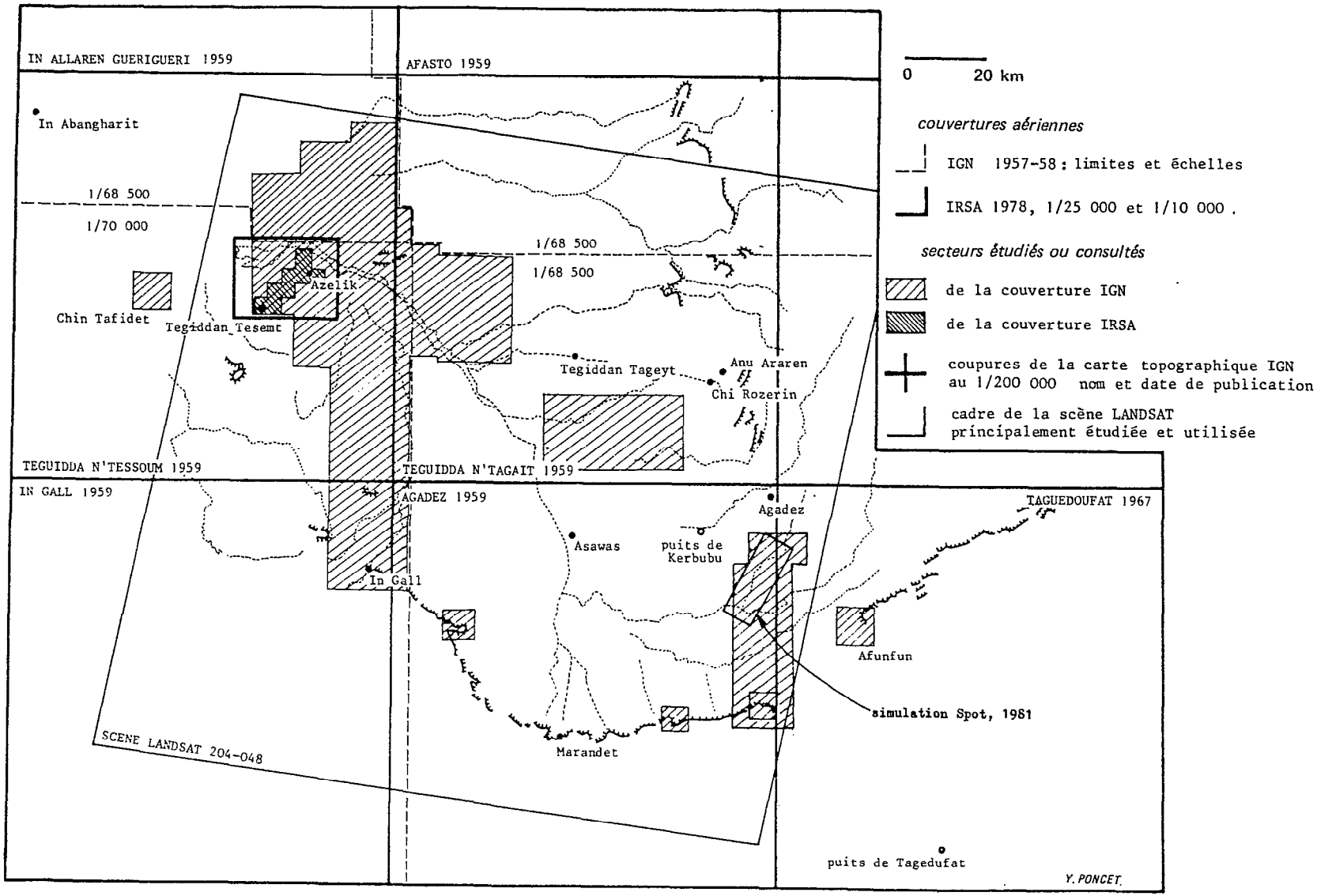


Figure 21 - Les données de la télédétection

Les campagnes de terrain ont donc fourni un corpus d'observations effectuées sur un grand nombre de points répartis à travers la région d'Agadez et concernant la plupart des types de paysages de la plaine. Elles ont permis d'identifier la correspondance « couleur-texture » de chaque unité considérée sur image Landsat et sur le terrain ; d'identifier des constantes dans les modes de correspondance, des correspondances inattendues ou inexplicables, des anomalies.

Le but des campagnes de terrain étant aussi d'identifier la cause de ces anomalies, plusieurs lieux particuliers ont été examinés : l'*agoras* de Fagoshia, les environs de la butte d'Anyokan, le secteur de Shibinkar, sans que toutes aient pu recevoir d'explication satisfaisante.

2.3. L'INTERET DES RESULTATS

Les résultats appartiennent à plusieurs classes de l'information :

- résultats thématiques,
- résultats méthodologiques,
- problèmes soulevés par l'étude elle-même.

Les *résultats thématiques sont exposés dans la troisième* partie de ce volume.

Ce sont les *résultats méthodologiques* qui sont exposés en détail ici.

De façon générale, on peut déjà qualifier l'apport de la télédétection spatiale au programme de recherche concerné comme très positif : la quantité d'informations obtenue est considérable, à la fois sur le plan de la description et de la localisation des phénomènes et sur celui de leur explication.

Le fait de parcourir le terrain avec en main un document qui est son image exacte, sans la médiatisation des classifications du thématicien et du cartographe, est un apport essentiel : l'utilisateur courant des photographies aériennes connaît bien d'ailleurs cet avantage, avec des classes d'information et un rapport d'échelle différents toutefois.

La *photographie* Landsat donne une image du territoire à échelle, disons, moyenne : 1/500 000, 1/200 000... Cette dimension dépasse le niveau local et introduit instantanément à la juxtaposition des grands éléments, à leur interaction réciproque (perceptible ou présumée), en un mot au *système*.

Dans les conditions courantes, l'observateur n'a sous les yeux qu'une portion d'étendue limitée ; sauf relief accidenté et observation depuis des points culminants, ce sont les détails proches qu'il *voit* ; l'image Landsat au contraire permet de ne pas s'arrêter au détail (qu'elle est incapable de restituer), sa juxtaposition avec l'observation de terrain permet de passer immédiatement du particulier au général. S'il est courant que, au sol, « l'arbre cache la forêt », on peut dire que l'image Landsat restitue, elle, l'espace de la forêt toute entière, ses rapports avec les espaces voisins et lointains et la nature de ces espaces.

L'identification de *thèmes* a permis la localisation géographique d'objets considérés comme pertinents (les tracés hydrographiques fonctionnels et anciens, les aires forestières, les regs...) ; par voie de conséquence, elle a permis leur cartographie.

Elle a permis aussi, et c'est peut-être là le plus intéressant, de rechercher en termes de système l'explication de certaines localisations. C'est ainsi que les croissants à réflectance élevée dans tous les canaux qui font contraste avec les aires à réflectance basse de la zone des argilites ont intrigué le « lecteur » des données Landsat qui en a recherché l'origine ; il s'agit d'aires couvertes d'*Aristida sspp,* formation herbacée annuelle qui pousse au pied des talus argilo-sableux bien drainés du bassin de l'Eghazer. Cette formation végétale est très peu distincte sur les photographies aériennes examinées (couverture de 1955-56), soit parce que les conditions précédant la prise de vue n'avaient pas permis sa croissance, soit parce que la date de prise de vue ne permettait pas de la percevoir, soit parce qu'elle n'est clairement distincte que sur données multispectrales (voir plus loin p. 158).

La liste ci-dessous présente les thèmes identifiés, localisés, délimités par interprétation des images Landsat sur le bassin de l'Eghazer (1) et les nuances qui sont suceptibles de modifier certains termes de l'interprétation :

1. Sables nus ou très peu couverts de végétation, homogènes ou susceptibles d'être considérés comme tels dans la tache élémentaire, couleur peu variable sauf rubéfaction.

2. Sables à végétation herbacée contractée, hétérogène dans la tache élémentaire ; ils peuvent être différenciés :
- selon la *nature* de la végétation (espèce dominante) ;
- selon la densité du couvert ;
- selon l'activité chlorophyllienne du couvert.

3. Sables à végétation herbacée contractée et ligneuse éparse, hétérogènes dans la tache élémentaire ; ils peuvent être différenciés selon la densité du couvert herbacé, la densité du couvert arboré, l'activité chlorophyllienne.

4. Végétation herbacée dense de type *Aristida,* homogène dans la tache élémentaire.

5. Argiles claires et lisses, sans végétation, de type kaolinite, homogènes dans la tache élémentaire mais variables selon :
- la teinte des argiles,
- le glaçage superficiel et la taille des craquelures de retrait,
- l'éventuelle présence de cailloutis épars.

6. Argiles de teinte moyenne, pulvérulentes ou piétinées, homogènes dans la tache élémentaire, variables selon :
- la teinte des argiles,
- l'intensité du piétinement.

7. Argiles sombres à fentes de retrait, homogènes.

8. Argiles très sombres de type montmorillonite, à larges fentes de retrait et bombements superficiels, homogènes.

9. Regs à blocs vernis, homogènes dans la tache élémentaire, peuvent être différenciés selon leur origine lithologique ou pédologique :
- regs du glacis de la falaise de Tigidit,
- autres regs vernis.

10. Regs à blocs non vernis ou peu vernis, hétérogènes dans la tache élémentaire, variables selon :
- le degré d'intensité du vernis sombre,
- la combinaison lithologique des blocs (en particulier la proportion de quartz, qui influence couleur et brillance).

11. Roches compactes vernies et éboulis, homogènes dans la tache élémentaire ; présentent par endroits des caractères particuliers dus au relief en bas de pente par l'apparition de talwegs sableux les rendant hétérogènes dans la tache élémentaire.

---

(1) Thèmes cartographiés, voir les volumes *Rapport Final du Programme Archéologique d'Urgence,* Poncet 1983 ; Bernus, Bernus et Poncet, 1984 ; Bernus et Poncet, 1984.

Les roches compactes et les éboulis rocheux peuvent être différenciés selon leur localisation et leur origine lithologique :

— type « grès du Tegama »,

— type « grès d'Agadez »,

— type « Aïr » (non différenciés ici, mais où les diverses formations lithologiques, volcaniques notamment, sont très nettes).

12. Eau libre, homogène dans la tache élémentaire, peut être subdivisée selon la profondeur ou la turbidité ; thème peu significatif en raison de sa faible extension.

13. *Agoras,* formation ligneuse à couronnes jointives ou quasi-jointives, hétérogène dans la tache élémentaire, peut être différenciée selon :

— la nature des ligneux (taille, espèce),

— la densité du couvert,

— l'état de la végétation (activité chlorophyllienne, âge des individus).

Les thèmes de végétation sont particulièrement délicats à étudier en raison de leur variabilité dans l'espace et dans le temps. Les sables nus ont une brillance plus élevée que les sables à végétation herbacée, qui ont eux-mêmes une brillance plus élevée que les sables à végétation mixte, herbacée *et* ligneuse (1). Par ailleurs, sur sol identique, c'est la densité du couvert végétal qui affecte la brillance, à partir d'un certain seuil. Nous souhaitions déterminer ce seuil et chercher des classes plus précises de *nature* (espèces) et de *densité* du couvert végétal.

En fait, hormis les thèmes 1, 2 et 3 ci-dessus (qui restent imprécis) et les thèmes 4 et 13 qui, au contraire, sont très précis dans leur contenu et leur localisation, nous n'avons pu travailler sur le détail de la végétation : entre le moment de l'enregistrement Landsat (janvier 1976) et les périodes d'observation (décembre 1979 et décembre 1980) les conditions naturelles n'étaient plus les mêmes sur les zones-test : la vallée de Sekiret, très arrosée en saison des pluies 1975 n'avait reçu que très peu de pluies en 1979, l'état de la végétation (des herbacées annuelles notamment) n'était plus comparable. Dans la forêt de Kerbubu, autre site-test, des travaux de génie rural avaient notablement modifié les aires d'activité et de recru des ligneux au moment des observations sur le terrain et des coupes étaient en cours.

Nous n'avons donc pu nous appuyer avec certitude que sur les observations faites sur les sables d'Azelik, milieu hétérogène dans lequel les plaques de cailloutis affectent la réflectance par endroits.

Par contre, la préparation numérique aux travaux de terrain en ce qui concerne les formations de surface dans la région d'Azelik s'est révélée très efficace : aucune des unités géographiques isolées et délimitées par les dégradations de niveaux de réflectance ne s'est avérée aberrante et l'examen du terrain a permis d'affiner les niveaux radiométriques et ainsi de préciser certaines limites et certains rapports de valeur ce qui est loin d'être négligeable.

Les *loteries* par contre n'ont pas été utilisables : elles introduisent une précision et des nuances qui ne peuvent être critiquées sans une connaissance très précise du terrain : les pratiquer au niveau de la *préparation* est sans intérêt car elles présentent une masse d'informations trop abondante, dont on ne sait lesquelles sont pertinentes. Bien entendu, elles seront parfaitement utilisables, après vérification sur le terrain et affinement des niveaux radiométriques si cela est nécessaire, pour dresser les *cartes radiométriques* très proches de cartes thématiques après que les combinaisons utiles aient été reconnues et conservées.

Cependant, des confusions n'ont pu être levées aisément et il reste dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez des secteurs mal élucidés sur le plan thématique aussi bien parce que leur signal radiométrique est mal isolé que parce que leur signification morphologique est mal éclaircie : on s'aperçoit ainsi qu'un objet géographique n'est aisément identifiable sur image Landsat qu'autant qu'il est aisément identifiable sur le terrain en termes de morphologie et de genèse. C'est le cas que nous avons rencontré notamment avec la formation « des terrasses de l'Eghazer », regs mal saisis sur le terrain et sur l'image.

(1) Ce n'est que sur les terrains sableux que l'on rencontre des formations végétales mixtes, herbacées et arborées. Les argiles et les regs sont presque dépourvus de végétation en saison sèche, exception faite des aristida.

3. L'ETUDE DE L'AZAWAGH CENTRAL ET DES DALLOLS

L'étude de la vallée de l'Azawagh et de ses bordures par télédétection spatiale Landsat a été menée grâce aux résultats méthologiques et thématiques de l'opération préalablement menée dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez. Toutefois, les caractères du terrain, les données utilisées et la façon dont nous nous en sommes servi diffèrent sensiblement.

L'objectif n'était pas le même : alors que dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez, l'étude géographique était concomitante à l'étude archéologique (elle l'a même quelquefois suivie), dans l'Azawagh l'étude géographique est nettement préalable à celle des traces de peuplements anciens.

A la fin de l'opération archéologique et géographique menée dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez, le projet a été fait d'expérimenter les méthodes de travail sur un terrain voisin par ses caractères et pourtant différent, et de rechercher les traces de peuplement qui auraient pu se fixer, au cours des épisodes de dessèchement qui ont suivi la période Néolithique, le long de l'axe hydrographique de l'Azawagh et de ses affluents.

La préparation des travaux archéologiques devait être faite en sorte que les problèmes logistiques (considérables) soient réduits au minimum. Entre autres modes de préparation, il a paru utile de diviser le territoire en aires d'« égal intérêt archéologique », dans lesquelles la prospection serait effectuée dans les mêmes termes.

Les termes de la prospection dépendent :

— de ce que l'on peut s'attendre à trouver (sites de surface, édifices funéraires, gravures rupestres, etc.),

— des lieux préférentiels dans lesquels on est supposé les trouver (sommets de dunes fixées, regs à gros blocs, parois rocheuses...)

— des éventuels recouvrements (éoliens, alluviaux, pédologiques) susceptibles d'occulter les indices.

Il paraissait alors intéressant de tracer une cartographie des caractères physiographiques du territoire à étudier en s'attachant en outre aux axes hydrographiques dispensateurs de l'eau à l'égard desquels la disposition géographique des vestiges d'occupation humaine n'est pas indifférente.

La nature et la densité de la végétation ne sont pas non plus indifférentes ; de la densité dépend le mode d'investigation archéologique ;

Enfin, les ensablements peuvent donner des indications : d'une part, il ne semble pas utile d'envisager des prospections archéologiques systématiques dans les zones d'ensablement très récent ou actuel ; d'autre part la succession phases d'ensablement — phases de dégagement dans les grandes vallées peut donner d'utiles indications sur les chronologies relatives.

Il s'agissait donc pour le géographe :

— de proposer très rapidement aux chercheurs de l'équipe pluridisciplinaire un document de travail préalable à des études approfondies, susceptible d'orienter rationnellement ces dernières vers les aires et les thèmes présumés importants ;

— d'expérimenter l'extrapolation des résultats scientifiques et méthodologiques de l'étude du bassin de l'Eghazer à celui de l'Azawagh, qui en est un prolongement naturel.

Les moyens et les contraintes ont arrêté l'opération à l'exploitation rapide avec des moyens légers :

— interprétation des images sous forme photographique en compositions colorées standard à 1/500 000 ;

— interprétation d'une vue principale, complétée si possible par une vue dite « secondaire »;

— présentation des résultats sous forme de cartographie manuelle à la même échelle.

Faute d'une *vérité-terrain* sur les pays de l'Azawagh, l'examen des données Landsat a été affiné par des photographies aériennes sur des zones-test de très petite extension et par la comparaison avec les cartes existantes : cartes topographiques et documents cartographiques sur la végétation. Par ailleurs, l'expérience acquise au cours de l'étude sur le bassin de l'Eghazer a permis de gagner du temps dans la réalisation de ce programme, plus superficiel certes, mais concernant une région apparemment plus homogène.

Les travaux normaux de l'équipe pluridisciplinaire ne concernaient pas la partie méridionale du bassin de l'Azawagh, c'est-à-dire la région des dallols, qui fait l'objet de recherches menées par ailleurs (Université de Niamey). Mais il a paru logique de poursuivre l'étude hydrographique et paléo-hydrographique de l'Azawagh jusqu'à son terme géographique, c'est-à-dire jusqu'à son confluent avec le fleuve Niger ; il n'était pas sans intérêt d'étudier, dans des milieux naturels et des formations de surface voisins, les indications radiométriques des thèmes « naturels » et des thèmes humanisés, d'inclure le « fait sédentaire » et son contact avec le « fait nomade » dans l'interprétation des données Landsat ; enfin, l'extension large en latitude (il y a une différence de 6° entre notre limite nord et notre limite sud) permettait d'aborder le passage de la zone sub-saharienne à la zone sub-soudanienne et la façon dont il se manifeste sur les données Landsat.

3.1. LES VUES LANDSAT UTILISEES

Les données Landsat ont été exploitées sous forme photographique uniquement, compositions colorées standard à 1/500 000 quand les négatifs des canaux 4, 5 et 7 étaient disponibles, positifs film du canal 6, seul disponible sur certaines vues, dans les autres cas. L'étude devant être rapide et faite avec les moyens légers immédiatement accessibles, nous avons utilisé les données photographiques archivées à la téléthèque de l'ORSTOM sans en acquérir d'autres.

La vallée de l'Azawagh et ses bordures, jusqu'au fleuve Niger est concernée par 9 scènes irrégulièrement enregistrées entre 1972 et 1978. Sur chaque scène, la vue principale (celle que nous avons appelée « de première série ») a été choisie pour sa représentativité d'une situation « moyenne ». La vue de la « deuxième série » (vue « secondaire » a été choisie de préférence une année ou une saison différentes de la première.

La liste ci-après présente la liste des vues exploitables ou présumées exploitables en indiquant les dates de celles que nous avons effectivement examinées et le traitement photographique appliqué.

trace-rang	*date*	*qualité*	*ennuagement*	*remarques*
205-047	**28/08/72**	8885	0	vue principale, composition colorée
	08/11/72	5555	10	vue secondaire, canal 6 noir et blanc (très médiocre toutes les deux)
205-048	28/08/72	8885	0	illisible (nuages)
	05/02/75	5885	0	composition colorée, seule vue lisible
	27/12/73	5255	10	illisible (nuages)
206-048	**08/05/73**	8888	0	composition colorée, vue principale
	28/12/73	8282	10	
	08/03/76	5888	10	
	26/03/76	8508	0	composition colorée, vue secondaire
	30/09/78	5858	10	

207-048	**10/11/72**	8888	10	composition colorée, vue prinpale
	29/12/73	8828	80	ennuagement 0 en réalité
	27/03/76	5888	0	
205-049	**12/06/73**	8888	0	composition colorée, vue principale
	27/12/73	5555	0	
	05/02/75	5588	0	
	13/01/76	5858	0	
	18/02/76	5558	0	composition colorée, vue secondaire
	25/03/76	5888	0	
	24/08/78	5588	10	
206-049	09/11/72	5555	0	
	20/04/73	8888	10	
	08/05/73	8588	0	
	28/12/73	8588	10	
	25/05/75	8888	0	
	19/02/76	5555	0	composition colorée, vue principale
	08/03/76	5888	10	
	30/09/78	8888	10	composition colorée, vue secondaire
207-049	10/11/72	8888	10	
	29/12/73	8828	50	ennuagement nul en réalité
	13/06/75	5888	0	
	19/07/75	8888	0	
	15/01/76	8888	0	composition colorée, vue principale
206-050	28/12/73	8888	20	ennuagement nul ou quasi nul
	20/04/73	8888	0	canal 6 noir et blanc, vue secondaire
	08/05/73	8888	0	
	29/09/73	8888	10	
	06/02/75	5858	0	
	05/08/75	8888	0	
	10/09/75	5885	0	
	26/03/76	8888	0	composition colorée, vue principale
206-051	20/04/73	8888	0	
	08/05/73	8888	0	
	29/09/73	8888	10	
	28/12/73	8888	0	canal 6 noir et blanc, vue secondaire
	25/05/75	8858	0	
	27/12/75	5588	10	
	08/03/76	5588	10	
	26/03/76	8585	0	composition colorée, vue principale
	25/08/78	8888	10	
	12/09/78	8888	10	
	30/09/78	8888	10	

Une partie des vues a été enregistrée au cours d'années particulièrement sèches (1972 et 1973). Une autre partie a été enregistrée après une saison des pluies considérée comme humide (1975) : ces disparités peuvent entraîner des différences importantes dans la restitution de l'information sur la végétation. Mais ces disparités sont compensées en partie par la saison de prise de vues : on peut supposer que l'état de la végétation, assez longtemps après les pluies d'une année « normale », reste voisin de l'état de la végétation au tout début de saison sèche d'une année particulièrement déficitaire sur le plan pluviométrique. Cette remarque est valable dans un plan général, car les périodes de sécheresse accentuée peuvent entraîner des modifications *partielles* de la végétation (non croissance de telle espèce dans tel biotope précis ou présence exclusive de telle autre...) donc des modifications *partielles* de l'image.

Ceci dit, toutes les disparités inter-annuelles ne sont pas annulées par le choix, même attentif, des dates de prises de vue et les variations occasionnelles doivent être prises en compte pour l'interprétation.

Sur la scène 205-048, immédiatement voisine de la scène 204-048 du bassin de l'Eghazer wan Agadez et qu'elle couvre en partie, une seule vue est disponible. Elle est partiellement couverte de nuages dont les ombres portées gênent.

La scène 206-048 est étudiée sur une vue de mai 1973, (année très sèche, fin de saison sèche) et complétée par une vue de mars 1976 (année plus humide, saison sèche moins avancée) sur laquelle la végétation — ou plus exactement *les contrastes de végétation* sont mieux visibles. La scène voisine, 207-048 est à peu près dans la même situation, à ceci près que la vue principale est de novembre 1972 (début de saison sèche d'une année très sèche).

La scène 205-049 est principalement étudiée sur une vue de juin 1973 : nous n'avons aucune information météorologique précise permettant d'affirmer qu'il ait déjà plu sur la région (celle de Tchin-Tabaraden et Tahoua) au 12 juin 1973 : l'examen de la vue semble montrer un voile atmosphérique sans qu'il soit permis d'affirmer que le sol ait été arrosé partout ni même qu'il s'agisse d'un voile d'humidité ; nous sommes là au sud du 15e parallèle et même en fin de saison sèche, la végétation herbacée et ligneuse est abondante et relativement dense partout, y compris en dehors des grandes vallées.

La scène 206-049 a été étudiée sur une vue de février 1976, année et saison « moyennes » ; la vue secondaire a été choisie en septembre 1978 : c'est l'une des rares vues de ce mois dont nous disposions pour toute la région, particulièrement intéressante car elle présente la situation en fin de saison des pluies : végétation active, mares pleines, rivières fonctionnelles...

Les trois autres scènes (207-049, 206-050 et 206-051) présentent des situations semblables : la vue principale est enregistrée en saison sèche de 1976 (janvier et mars), la vue secondaire est enregistrée en 1973, année déficitaire.

Les deux scènes les plus méridionales (206-050 et 206-051) sont dans les deux cas enregistrées le même jour, ce qui a l'avantage de présenter entre autres une apparence agricole semblable.

Dans toutes les régions de l'Azawagh, toutes les vues, (sauf celle de septembre), présentent la végétation sous des phases non actives ou peu actives, mises à part :

— les formations arborées et arbustives linéaires du fond des vallées, qui profitent de la nappe d'inféroflux ;

— dans le sud (scènes 206-050 et 206-051), les aires à *Acacia albida,* arbre qui est dans sa plus forte activité en saison sèche.

Le tableau ci-après donne une idée succincte de la situation pluviométrique ayant précédé chaque enregistrement utilisé, d'après les relevés de quelques stations situées dans la scène ou à la même latitude dans une scène voisine.

TABLEAU : ENREGISTREMENTS LANDSAT ET PLUVIOMETRIE

scène	*vue*	*station de référence (1)*	*date et hauteur des pluies précédant l'enregistrement*	*Nombre de mois secs depuis la dernière pluie*
205-047	08.11.72 (a)	Agadez	92,6 mm en 21 jours en 1972 dont 57,7 mm en août (9 jours) et 7,2 mm en septembre (3 jours), **ANNEE TRES DEFICITAIRE**	**2**
205-048	05.02.75 (b)	Agadez	136,4 mm dans toute la saison précédente (1974) en 23 jours, **ANNEE NORMALE**	**6**
206-048	08.05.73 (c)	Agadez	cf. (a)	**9**
	26.03.76 (d)	Agadez	130,9 mm sur 27 jours en 1975, **ANNEE LEGEREMENT DEFICITAIRE**	**7**
207-048	10.11.72 (e)	Agadez	cf. (a)	**2**
	27.03.76 (f)	Agadez	cf. (d)	**7**
207-049	15.01.76 (g)	Tchin Tabaraden	Environ 306 mm en 1975, dont 90 mm en septembre, **ANNEE NORMALE**	**4**
	29.12.73 (h)	Tchin Tabaraden	110,8 mm sur deux mois (juillet et août), **ANNEE TRES DEFICITAIRE**	**4**
206-049	19.02.76 (i)	Tchin Tabaraden	cf. (g)	**5**
	30.09.78 (j)	Tchin Tabaraden	297,8 mm au 30 septembre, saison des pluies inachevée, 12,2 mm en octobre, **ANNEE LEGEREMENT EXCEDENTAIRE**	**0**
205-049	12.06.73 (k)	Tchin Tabaraden	Non relevée en 1972, aucune pluie au 12 juin 1973	**9 ?**
	18.02.76 (l)	Tahoua	267,1 mm en 38 jours en 1972, dont 28,4 mm en septembre et 6,8 mm en octobre, **ANNEE DEFICITAIRE**	**8**
	18.02.76 (m)	Tchin Tabaraden	cf. (g)	**5**
206-050	26.03.76 (n)	Filingué	370 mm environ dont 40 mm en septembre et peut-être des pluies en octobre, **ANNEE NORMALE**	**5**
	28.12.73 (o)	Filingué	215,7 mm, **ANNEE TRES DEFICITAIRE**	**4**
206-051	26.03.76 (p)	Dosso	790 mm environ dont 290 mm en septembre 1975, des pluies en octobre et peut-être aussi en novembre, **ANNEE NORMALE**	**4**
	28.12.73 (q)	Dosso	127,4 mm douteux, tombés en mai et juin ; juillet et août semblent ne pas avoir été relevés	**6 ?**

(1) Les relevés sont parfois sujets à caution ou incomplets. Soulignons que les valeurs pluviométriques enregistrées à la station de référence ne sont que très partiellement indicatives de la quantité de pluies réellement tombées sur toute la région environnante.

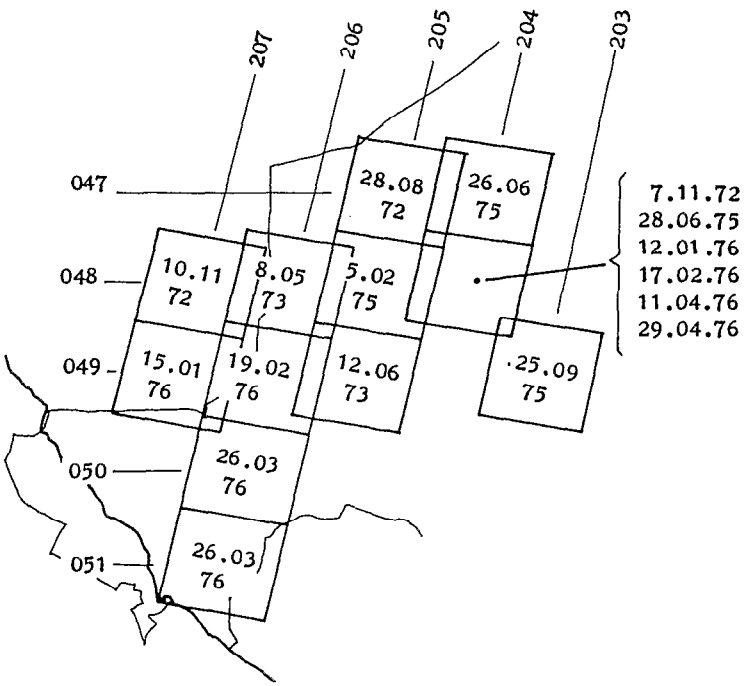


Figure 22 - Vues de première série (compositions colorées)

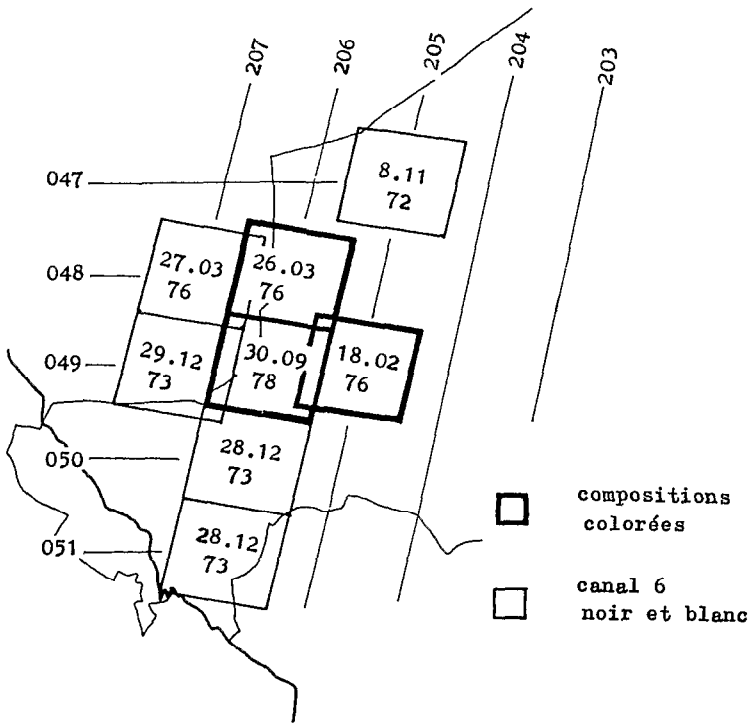


Figure 23 - Vues de deuxième série

0 200 km

3.2. L'ACQUISITION DE L'INFORMATION

L'information de base a été obtenue en examinant les compositions colorées standard de la première série d'images ; elle a été complétée par les indications des cartes topographiques et des échantillons de photographies aériennes, par l'examen des compositions colorées ou des films positifs des vues de la deuxième série.

3.2.1. Les unités de teinte-texture

Un premier traitement a été effectué sur la *première série* image par image en isolant les unités qui paraissent homogènes selon trois critères à la fois :

- la *couleur* dominante (1),
- la texture de l'image,
- la netteté de contraste des limites avec les unités voisines.

Ceci sans rechercher, à ce stade, l'interprétation du contenu de chaque unité en termes de paysages ou d'interprétation géographique, plus exactement en s'efforçant de ne pas faire intervenir, dans la délimitation des unités isolées, les éléments connaissables du terrain.

Les éléments connus sont intervenus ensuite, du moins en partie, pour concourir à l'*interprétation,* à la *définition* de chaque unité.

Sur un ensemble de 8 images (2) on a ainsi identifié 88 unités dont plusieurs sont évidemment communes à plusieurs images, soit une moyenne de 11 unités par image. Sur ces 11 unités, 7 sont communes à la majorité des images (même teinte, même texture, même type de limites), les autres sont spécifiques à certaines images, soit à cause de la latitude, soit à cause de la date de prise de vue. Les *limites* sont différenciées en trois types : cerne contrastant (clair ou foncé) ; contraste de réflectance net (couleur, intensité ou texture très différentes) ; contraste de réflectance flou.

Les unités identiques en teinte-texture-limites étant destinées à être cartographiées (c'est-à-dire *délimitées* et *classées*) on a regroupé quelques-unes de ces unités :

- pour éviter de conserver des unités trop petites spécifiques à une seule image : elles furent *a priori* considérées comme occasionnelles et dépourvues d'intérêt *dans le cadre de cette préparation simplifiée,* et dans ce cadre uniquement ;
- pour simplifier le document de travail en ne conservant qu'un nombre d'unités limité ;
- pour supprimer des limites qui, au deuxième ou troisième examen, ne paraissaient plus absolument significatives ou trop floues pour être péremptoirement tracées.

Par contre, on a apporté grand soin au repérage et à la figuration des linéaments quelle que puisse être leur origine car leur localisation, leur extension, leur orientation et leur organisation peuvent fournir des informations originales et irremplaçables...

A ce niveau et sauf exception, il n'est pas possible de faire une *interprétation vraie* des unités ainsi déterminées. La *signification* de certaines d'entre elles est évidente (les grandes vallées fossiles, les formations arborées denses, les aires cultivées, les aires rocheuses vernies...) et dans quelques cas il est possible d'*interpréter* le signal (le sable nu des aires cultivables, nettoyées et prêtes pour les semailles sur les vues de fin mars) mais il n'était pas encore question d'*interpréter* le contenu de chacune des 19 unités sélectionnées en termes thématiques.

---

(1) C'est-à-dire le *canal*, la bande spectrale décisive pour l'isolement de l'unité.

(2) L'image 205-047 du 28 août 1972 n'a pas été traitée : elle présente des contrastes trop flous et une qualité très insuffisante, dus à la date de prise de vue et à la réelle uniformité du territoire.

3.2.2. L'aide des cartes topographiques et des photographies aériennes

Les cartes topographiques sont, sur les territoires de l'Azawagh et des dallols, anciennes mais de bonne qualité ; elles ont été utilisées, avec les photographies aériennes, pour *vérifier* d'une part, *préciser* d'autre part les limites et le contenu des unités retenues.

Les cartes topographiques ne portent pas d'indications de végétation ou de nature du sol suffisamment complètes et détaillées pour permettre une réelle interprétation des unités. Mais juxtaposées au document provisoire cartographiant ces unités, elles ont permis de comparer le tracé des limites retenues. On a ainsi constaté que dans la plupart des cas, les limites correspondaient, quelle que soit leur nature : contact sable-rocher, différences de végétation, courbes de niveau même, pour ne citer que quelques exemples élémentaires...

Les différences de tracé importantes et les lacunes ont paru particulièrement dignes d'intérêt : elles ont été relevées afin de rechercher une confirmation de leur réalité permanente ou au contraire des indices de leur instabilité ; cette recherche a été effectuée principalement sur les vues de la « deuxième série ».

Sur une aussi vaste surface de territoire (16 degrés carrés environ) il a paru sans intérêt de rechercher confirmation intégrale de toutes les limites et de tous les contenus, au moyen de la couverture aérienne : ce qui n'avait pu être pratiqué dans l'étude sur l'Eghazer wan Agadez ne pouvait guère l'être davantage dans l'Azawagh... Nous n'avons donc consulté les photographies aériennes que comme échantillons, sur des surfaces très limitées, des « zones-test » presque ponctuelles, traitées par examen stéréoscopique de trois clichés pour la plupart de ces échantillons.

L'emplacement des « zones-test » a été choisi d'après trois critères :

— en tout premier lieu, la disponibilité des clichés : ceux-ci ont été consultés dans les services concernés à Niamey et Bamako (services topographiques nationaux et agences de l'IGN) qui ne disposent pas de couvertures absolument complètes : certains échantillons ont dû être « déplacés » pour correspondre à des clichés disponibles ;

— disposer d'un échantillon au moins (davantage si possible) *dans chaque unité* afin d'en faire l'*interprétation* ;

— disposer d'un ou plusieurs échantillons *sur les limites* entre unités qui paraissaient particulièrement intéressantes, soit à cause de leur netteté, soit au contraire à cause de l'absence de netteté.

Au nord du parallèle 15° 30' sur le territoire nigérien et sur toute la portion de territoire malien étudiée, ce sont les photographies à 1/50 000 de 1955-56 qui ont été consultées. Au sud de ce parallèle, ce sont les photographies aériennes à 1/60 000 de 1975 (de meilleure qualité) qui ont été consultées.

Sur ces paysages sableux pour la majorité des surfaces, couverts d'une végétation herbacée à albédo élevé et par endroits d'une végétation ligneuse à albédo réduit et de vernis sombres, les photographies aériennes ont restitué le contraste entre les unités plus petites que la tache élémentaire Landsat, elles ont restitué la *texture* vraie du paysage : l'exemple le plus simple est le rapport de disposition et de surface occupée entre les dunes couvertes d'herbes et les bas-fonds argileux occupés par une végétation ligneuse.

3.2.3. Les images Landsat complémentaire de la « deuxième série »

Les images Landsat dites « de la deuxième série » n'ont été rendues disponibles qu'*après* que celles de la première série aient été étudiées et confrontées aux informations des cartes topographiques et des photographies aériennes.

La comparaison a été effectuée sur les six scènes (voir figure 23, page 97) concernées par deux séries d'images : nous ne traitons pas ici de l'étude qui a été faite sur le bassin de l'Eghazer wan Agadez au moyen des cinq vues de bonne qualité disponibles sur cette seule scène.

Sur les six vues de la deuxième série, trois sont disponibles en composition colorée (canaux 4, 5 et 7) comme celles de la première série, trois sont examinées sous la forme de positifs sur film du canal 6 : si les

premières sont donc comparables, les secondes ne le sont pas exactement puisqu'il ne s'agit pas des mêmes bandes spectrales.

Sur les images de la deuxième série, on a recherché, comme on l'avait fait sur les cartes topographiques, la confirmation des limites des unités relevées sur les images de première série, la confirmation de l'interprétation de leur contenu et éventuellement une plus grande précision dans cette interprétation ou dans la mise en évidence de facteurs discriminants avec les unités voisines ; enfin on a recherché des informations supplémentaires, des unités nouvelles non encore relevées.

Parmi les limites entre unités de teinte — texture homogène, la deuxième série d'images a confirmé toutes celles qui se présentaient sous une forme très nette. Dans certains cas, ces limites apparaissent même encore plus nettement sur l'image de seconde série : c'est le cas, sur les scènes 206-050 et 206-051, du contact entre unités dépourvues de végétation et unités normalement couvertes ; le contraste est accentué sur la vue de 1973, où les aires faiblement couvertes en temps normal étaient alors dénudées à cause de la sécheresse. Sur la scène 206-051, la tache noire des villages, au milieu de leur territoire très clair, est particulièrement nette. Mais la bande spectrale du document examiné peut aussi jouer un rôle : le canal 6 de la seconde série restitue plus nettement la différence entre sol nu et sol couvert que les trois autres canaux...

Sur la scène 205-049 aussi, la date d'enregistrement de la deuxième série renforce certaines unités déjà relevées : les éléments hydrographiques (eau libre, linéarités de végétation active) sont plus nettement visibles sur la vue du 30 septembre... Sur toutes les scènes, le contraste entre les grandes vallées fossiles et leurs bordures reste bien visible, renforcé sur l'image de saison des pluies.

En revanche, les limites peu nettes sur les images de la première série n'ont pas toutes été confirmées : c'est le cas des limites présumées comme *purement végétales* entre des unités dont la différence de végétation ne paraît pas sous-tendue par une différence pédologique, lithologique ou d'organisation des sables. C'est ainsi que certaines limites — assez ténues au demeurant — entre des unités de teinte différente et de texture semblable sur la première série n'ont pas été confirmées sur la seconde ou ont été remplacées par des contours différents. On peut en déduire que ces unités n'ont qu'une existence occasionnelle (saisonnière ? exceptionnelle ?), qu'elles correspondent à une densité, à un faciès différents de la végétation *herbacée* ou de la végétation *herbacée et arborée* ; ces différences sont présumées avoir été engendrées par la répartition et/ou par l'abondance des pluies, par le mode de dessèchement de la végétation au cours de la saison sèche, par l'exploitation humaine et animale éventuellement... Faute d'informations très précises sur ce qui se passait sur le terrain même lors de l'enregistrement de chacune des vues, il paraît impossible de proposer des interprétations sûres.

L'image de deuxième série a quelquefois permis de préciser des éléments d'interprétation qui avaient échappé à l'examen de la première série. C'est le cas de la discrimination entre certains bas-fonds argileux et les hauteurs voisines à regs vernis ou argilites (1) : sur les images de la première série, cette différenciation avait souvent été très incertaine et même impossible ; ce sont les cartes topographiques qui en avaient donné les termes exacts grâce aux indications d'altitude. Sur la scène 206-049, la vue du 30 septembre 1978 a fourni des éléments discriminants : les bas-fonds sont alors couverts d'une végétation saisonnière ou saisonnièrement active — très marquante dans le canal 5 ce qui les différencie des regs et corniches, eux-mêmes marqués dans le canal 7. Sur la scène 205-049, la première série (juin 1973) met peu en évidence les différences de végétation non plus que la végétation active et les contrastes sont en partie gommés par un voile atmosphérique probable, brume ou poussière ; la vue de février 1976 présente des contrastes plus accentués et une végétation active qui précise la nature des grands bas-fonds bordant la cuesta paléocène.

Dans la région de Sessao et de Mentès (scène 206-048) les linéarités très ténues de l'érosion sur la cuesta et son glacis sont bien marquées sur l'image de deuxième série : cette évocation du relief permet de différencier les regs vernis du plateau des dépressions fermées argileuses au pied de la cuesta. Ici c'est

(1) Il ne s'agit pas ici des *argilites de l'Eghazer*, formation géologique bien identifiée, mais des formations argileuses, argilo-calcaires ou argilo-gréseuses dures des plateaux de Tazerzaït.

peut-être d'ailleurs la qualité du négatif photographique qui est différente. Cette meilleure qualité a permis d'étudier toute la région du Tazerzaït avec plus de précision que précédemment.

Enfin, l'examen des vues de seconde série a permis d'acquérir un certain nombre d'informations supplémentaires. Certes, on n'y a pas identifié d'unités réellement nouvelles mises à part les aires à très forte réflectance, gypseuses, de la région de Tillia, mais des objets nouveaux sont apparus, notamment sur la vue du 30 septembre 1978 (scène 206-049) : les surfaces en eau libre, de nouvelles limites entre unités déjà identifiées (les rives de l'Azar à proximité de son « confluent » avec l'Azawagh), la précision de certains tracés hydrographiques (soulignés par la végétation très active des vallées) ; sur la scène voisine (205-049) les traces d'un épandage très récent sur un confluent (région de Tchin Tabaraden et vallée du Tadist).

C'est alors la date d'enregistrement qui met en évidence les transformations saisonnières du paysage, transformations qui aident à l'interprétation et à la cartographie des thèmes hydrographiques notamment.

Les vues de la seconde série ont donc apporté, outre des éléments nouveaux, de nombreuses informations utiles ; elles ont amélioré la perception du territoire par l'interprète en faisant la différence entre *unités permanentes* et *unités occasionnelles* ou changeantes : ceci donne aisance et fiabilité accrues à la délicate intégration qu'effectue le cerveau humain de la couleur, de la texture, de la forme, de l'emplacement relatif de chacune des unités perçues... S'agissant de l'étude d'un territoire mal connu dans le détail, la différenciation entre éléments stables et éléments non stables apparaît comme très importante.

3.3. LES RESULTATS

L'étude par télédétection spatiale des pays de l'Azawagh a donné lieu à une cartographie qui transcrit à 1/500 000 (c'est-à-dire à une échelle *moyenne*) les différentes unités identifiées sur image Landsat et leur correspondance paysagique. Ce document est reproduit ici sous forme réduite (cf. carte hors-texte et sa légende en fin de volume).

3.3.1. La « carte de reconnaissance physiographique de l'Azawagh »

La carte de reconnaissance physiographique est la traduction de la délimitation et de l'interprétation des unités homogènes observées sur les compositions colorées Landsat. Cette traduction implique une classification du contenu des unités et de l'aspect de leurs limites. Dans certains cas, cette classification est péremptoire et assurée, dans d'autres elle doit être assortie de précautions et accompagnée de nuances, afin que ne soient pas introduits des détails non vérifiés sur le même rang que des informations considérées comme assurées.

Dans un souci de standardisation relative au découpage cartographique, on a choisi celui de la Carte de l'Afrique de l'Ouest à 1/500 000 de l'IGN qui représente 3 degrés en longitude et 2 degrés en latitude. La carte est présentée en trois feuilles (pour conserver la maniabilité du format) : *Nord, Centre* et *Sud*. La feuille *Sud* est décalée de 1/2 degré vers l'ouest par rapport aux précédentes afin de représenter tout le Dallol Boso.

Les coordonnées géographiques indiquées sont celles des repérages Landsat et non celles des cartes IGN : la différence linéaire entre les deux réseaux est notable (5 mm environ sur deux degrés) mais nous avons considéré qu'elle n'était pas réellement gênante concernant un document de travail et qu'il n'y avait pas lieu de se préoccuper ici d'un redressement difficile à mettre en œuvre.

Parmi les 24 unités conservées, certaines ont été simplifiées : en ce qui concerne les thèmes 1, 2, 3, 17 et 18 les limites souvent floues ont été généralisées, les variations de faciès n'ont pas été figurées : l'extension géographique de ces thèmes telle que la carte la présente ne doit donc pas être considérée comme la correspondance stricte de leur extension sur le terrain.

Les thèmes 13 à 16 présentent également des variations de faciès qui n'ont pas été figurées ; on n'a pas cherché à mettre en évidence les traces d'exploitation humaine (champs, jachères, défrichements récents, etc.) au sud du 15e parallèle, non plus que les variations des types de végétation.

Faute d'avoir pu les identifier en détail, des faciès différents correspondant peut-être à des thèmes différents (mais non précisés) ont été regroupés sous les n° 17 et 18.

Les différentes interprétations du thème 12 sont identifiées sur la carte par un indice (a, b, c) quand cette interprétation est sûre. Il en est de même pour les thèmes 10 et 22. Les thèmes mixtes 7, 19 et 20 correspondent à une répartition spatiale inégale de thèmes très différents les uns des autres dont les composantes ne sont pas figurées dans le détail sur la carte bien qu'elles soient distinctes ou partiellement distinctes sur les images.

3.3.2. Sur le plan thématique : informations nouvelles et risques de confusions

C'est sur le plan paléo-hydrographique que les images Landsat ont apporté les informations nouvelles les plus nombreuses : le tracé linéaire des vallées peut être aisément suivi sur de grandes distances en raison de leur *forme*. Le réseau, actuellement non fonctionnel, peut ainsi être reconstitué de même que, dans certains cas, des tracés plus anciens que les documents dont nous disposions ne citent pas tous. C'est le cas en particulier du tronçon inférieur de l'Azar qui semble bien s'être raccordé à l'Azawagh en faisant le tour du massif d'Agalamlam.

Les cartes topographiques donnent certes des indications sur les tracés hydrographiques anciens, par interprétation des photographies aériennes puis généralisation. Cette généralisation masque souvent des détails de tracés que restitue instantanément et nettement l'image Landsat : c'est ainsi que la portion du Dallol Mawri qui se raccorde, aux environs du 15e parallèle, aux systèmes hydrographiques issus de la Tadarast et de la région de Tchin Tabaraden peuvent désormais être suivis dans le détail et leur quasi-continuité. Dallol Boso et Dallol Mawri sont souvent assimilés dans la littérature hydrographique, géographique, socio-économique : l'image Landsat montre que les bandes spectrales décisives et les textures d'image y sont tout à fait différentes et qu'en réalité les deux vallées n'ont aucun rapport entre elles quant aux alluvions, aux sols et à la végétation (naturelle ou sélectionnée par l'homme) qui s'y trouvent.

Les images Landsat font apparaître de nombreuses formes différentes de terrains sableux ondulés d'origine éolienne. Ces formes ne se rencontrent pas indifféremment en latitude, elles s'étagent du nord au sud et sont recoupées par un réseau hydrographique plus ou moins adapté, adaptations qui ont d'ailleurs contribué à donner aux formations sableuses des faciès différents.

La disposition relative des axes hydrographiques et des ensablements éoliens, la texture de ces derniers et les types d'organisation dunes — bas-fonds doit permettre d'établir une chronologie relative des événements climatiques et hydrographiques qui ont affecté les pays de l'Azawagh au cours du Quaternaire récent, peu étudié dans ces régions. En particulier, elle doit permettre de sélectionner, en vue d'une étude de détail, les points d'études géomorphologiques particulièrement intéressants : recoupements de cordons dunaires par des talwegs, lignes de dépressions fermées au pied des cuestas, par exemple.

Les images Landsat ont apporté des informations qui mettent en évidence des phénomènes variables à court terme dans le temps et dans l'espace : les défrichements agricoles notamment, les traces d'occupation humaine, directes ou indirectes.

Au nord du 15e parallèle, des secteurs agricoles sont bien visibles, plus clairs que les territoires environnants, délimités de façon nette par des tracés rectilignes ou anguleux suggérant une intervention non naturelle : ces faciès permettent de se faire une idée de l'amplitude et de la situation géographique en latitude des territoires occupés et modifiés aux fins agricoles l'année de la prise de vue.

Il faut faire une mention spéciale pour le ranch d'embouche bovine d'Ekrafane (dans la scène 206-049) très visible sur certaines vues, invisible sur la vue du 12 juin 1973, peu distinct sur celle du 30 septembre 1978. La présence de ce ranch sur les vues Landsat et la signification de sa signature spectrale ont fait

l'objet de polémiques dans les milieux des agrostologues et des services d'élevage en 1974 : d'abord montré comme preuve de l'intérêt économique des périmètres de pâturages gérés (les basses réflectances étant censées traduire une végétation encore dense malgré la sécheresse), le périmètre d'Ekrafane a ensuite été décrit (à partir de la même vue) comme une aire de dénudation gravissime : les animaux prisonniers des clôtures auraient brouté jusqu'au dernier brin d'herbe, laissant visible le sol nu à caractère argilo-sableux, peu réfléchissant... Une enquête faite à Niamey plusieurs années plus tard (1976) pour déterminer ce qu'il en avait été réellement, a donné des résultats parfaitement contradictoires. Or la nature du terrain, sur l'emplacement du ranch, est davantage sableuse qu'argileuse et sa dénudation donnerait plutôt des réflectances élevées. En revanche, une observation au sol faite en novembre 1984 dans la région de Tchin Tabaraden donne des arguments à l'interprétation inverse : sur le terrain, les sols sableux beige rougeâtre (piétinés de surcroît ce qui les rend plus absorbants sur le plan radiométrique) paraissaient beaucoup plus foncés que les périmètres défendus par des clôtures, couverts d'une végétation herbacée courte, serrée, jaune clair, nettement contrastante, par sa brillance, avec les espaces non protégés : il se serait produit ici, dans des conditions naturelles très voisines de celles d'Ekrafane (même milieu, mêmes conditions pluviométriques) l'effet inverse ; à Ekrafane en juin1973, le périmètre « défendu », surpâturé, apparaît foncé sur l'image ; à Tchin Tabaraden en 1984, le périmètre réellement défendu se dessine en clair sur les aires surpâturées sombres. Dans les deux cas, la dégradation apparaît bien *en sombre* sur fond clair.

Cet exemple montre quelles précautions il convient de prendre pour proposer des interprétations d'images spatiales dans les milieux où la dynamique des paysages n'est réellement connue ni dans son fonctionnement ni dans ses effets.

Ceci nous amène à citer quelques anomalies et confusions ou incertitudes, qui ont été parfois levées grâce aux cartes topographiques, aux photographies aériennes et à l'examen attentif des vues de la deuxième série.

Comme dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez, il y a, dans l'Azawagh, risque de confusion entre certains regs et certaines argiles : les organisations hydrographiques permettent parfois de différencier les aires en relief (les regs généralement) des dépressions (tapissées d'argile) mais cette différenciation par le relief n'est pas systématiquement exacte et il faut pour la pratiquer, que les réseaux hydrographiques soient perceptibles sur l'image.

Sauf en ce qui concerne les alignements de végétation dense le long des grandes vallées -- qui constituent un cas particulier — les données Landsat ne permettent pas à elles seules de déterminer des faciès végétaux avec certitude. Après comparaison entre les informations issues de Landsat et les informations issues des autres sources, il s'est avéré que les unités sélectionnées d'après Landsat correspondaient bien à des unités morpho-végétales pour la plupart et que les différences entre unités sélectionnées correspondaient à des différences d'organisation de la végétation sur des formations de surface différentes : dans les aires dunaires, la végétation herbacée des dunes et la végétation ligneuse des bas-fonds s'organisent en textures réticulées plus ou moins allongées, plus ou moins régulièrement orientées, aux mailles plus ou moins grandes... mais l'image Landsat restitue rarement la *réalité* de ces organisations même si elle restitue en effet *une* (ou des) organisation(s).

Citons enfin quelques « anomalies » observées sur certaines vues Landsat et provisoirement qualifiées comme telles parce qu'on n'a pu ni les interpréter ni même en discerner l'origine.

La scène 206-049, vue du 19 février 1976, mais aussi les scènes voisines (scène 205-049) vue du 12 juin 1976 ; scène 206-048 vue du 8 mai 1973) présentent des linéaments parallèles, de direction nord-sud, approximativement équidistants... Sur les images en composition colorée, ces linéaments sont peu nets et se marquent par un assombrissement relatif sans changement de texture de l'unité sous-jacente (des sables partout). Ils sont surtout rendus visibles par leur continuité (une centaine de kilomètres ?) et leur rectilinéarité.

Il n'est pas absolument impossible que ces linéaments soient un *artefact* de l'image, une maladresse involontaire de la restitution photographique... Pourraient-ils être la trace d'un erg ancien, orienté perpendiculairement aux directions actuelles ? Nous avons tenté de retrouver trace de ces linéaments sur les photo-

graphies aériennes : quelque chose de comparable a été identifié sur un groupe de photographies aériennes dans la région de Filingué (*Dinkildimi,* cf. exemple cité p. 173) c'est-à-dire pas tout à fait dans la même région : notons le fait sans en tirer de conclusions pour le moment.

4. DEUX ETUDES COMPLEMENTAIRES : METEOSAT ET SPOT

Les pays de l'Azawagh ne sont pas concernés par la couverture du seul satellite Landsat : le satellite météorologique Météosat enregistre sur l'Afrique entière depuis la fin de 1977 ; des *simulations* d'enregistrements par le satellite Spot ont été faites en 1981 à partir d'un capteur Daedalus aéroporté sur plusieurs zones de faible extension chacune, en Afrique francophone. L'une d'elles couvre une aire de 150 kilomètres carrés environ dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez.

Nous avons donc cherché comment les données de ces satellites pouvaient compléter les informations acquises par Landsat.

4.1. UN « SURVOL » GENERAL PAR METEOSAT

Le satellite Météosat présente l'Afrique dans sa totalité avec une résolution au sol de 2,5 kilomètres dans le canal Visible : nous sommes donc loin de la relative précision Landsat (dont la tache élémentaire mesure 56 mètres sur 79) mais le territoire ainsi figuré en une seule fois et de façon homogène restitue les régions étudiées dans le contexte géographique beaucoup plus vaste de l'échelle continentale. Notre propos n'est pas d'étudier la météorologie et le climat ouest-africains ; mais le satellite Météosat peut fournir des indications sur les formations de surface (ensembles lithologiques, sables...) et la végétation.

4.1.1. Les données utilisées

Afin de ne pas alourdir la préparation de travaux qui privilégient volontairement l'utilisation d'autres sources, nous n'avons exploité que des données Météosat aisément et instantanément disponibles. Nous avons donc limité notre choix aux images photographiques déposées à la téléthèque de l'ORSTOM à Bondy. Cette téléthèque (non spécialisée dans les données Météosat puisque la majeure partie des études s'effectue à la base de Lannion) offrait en 1982 un nombre d'enregistrements limité, une dizaine d'images pour chacun des mois écoulés entre décembre 1977 et novembre 1979 (qui correspondent à ceux du satellite Météosat 1), soit 300 vues environ.

Parmi ces vues, seuls les enregistrements dans le canal *visible* ont été examinés. L'ensemble des pays de l'Azawagh est rarement dépourvu de toute couverture nuageuse : sur les 300 images examinées, 36 seulement (soit 12 %) présentaient une qualité satisfaisante pour l'étude de la surface de la terre : absence de nuages et de voile atmosphérique, brume ou poussière.

Sur ces 36 vues, 4 ont été sélectionnées parce qu'elles correspondaient à la fois à des dates intéressantes et à des heures voisines :

— 25 janvier 1979, 11 heures GMT : milieu de la saison sèche ;

— 12 avril 1979, 10 heures GMT : fin de la saison sèche, en particulier sous les latitudes méridionales ;

— 28 septembre 1979, 11 heures GMT : fin de la saison des pluies sur la majeure partie des pays de l'Azawagh ;

— 11 octobre 1978, 10 heures GMT : début de la saison sèche sur les latitudes septentrionales et moyennes des pays de l'Azawagh ; cette vue a été choisie parce que la « ligne de végétation », le contraste net entre les aires à végétation dense et active et les aires à végétation moins couvrante et moins active y

apparaît comme particulièrement visible et parce que cet enregistrement a été effectué moins de deux semaines après celui de Landsat sur la scène 206-049, vue du 30 septembre 1978.

Les vues ont été étudiées sur film positif agrandi à l'échelle approximative 1/9 300 000 (qui correspond à un agrandissement lisible maximal) d'une zone mesurant sur le terrain 2 250 kilomètres d'ouest en est (du lac Faguibine au lac Tchad) et 1 650 kilomètres environ du nord au sud (du massif de l'Ahaggar au lac de Kainji).

Les données photographiques agrandies ont été développées sous deux gammes de contrastes afin d'accroître la finesse de restitution, un tirage mettant en évidence les détails dans les aires claires, l'autre dans les aires sombres. Néanmoins, la qualité de la restitution est très inférieure à ce qui pourrait être obtenu en utilisant les *données numériques* : la mise en œuvre des traitements et de la visualisation posait alors des problèmes de disponibilité des outils, de compatibilité des données et de délais tels que nous avons renoncé, sur le moment, à cette opération (1). Les résultats sont donc rudimentaires et améliorables. Ils complètent cependant la présentation géographique du territoire étudié et introduisent à l'étude thématique plus précisément menée au moyen des données Landsat.

4.1.2. Les informations obtenues

Les quatre vues étudiées proposent à peu près la même image à l'intensité des gris représentant la végétation dense du sud près. Elles ont donc été exploitées ensemble ; le principal intérêt de cette multiplicité a été de confirmer que certains objets, relevés sur toutes les images au même emplacement géographique et sous une forme voisine, n'étaient pas des *artefacts* dus à la manipulation ou à des défauts du négatif photographique : ce fut le cas notamment de certains objets d'aspect linéaire.

Les régions de l'Azawagh sont aisément repérables sur les données Météosat : le massif de l'Aïr apparaît en sombre, avec l'angle orthogonal caractéristique du sud-ouest. Tout proche, le triangle des *argilites de l'Eghazer* est non moins visible, séparé du massif par la bordure claire des *grès d'Agadez,* sableux en surface. Les massifs à blocs vernis ou cuirassés des pays de l'Azawagh sont bien identifiables : Agalamlam d'une part, Ader d'autre part. La grande vallée de l'Azawagh se marque par des réflectances légèrement plus élevées que son voisinage ; au sud et à l'ouest de la zone, le mince ruban noir des eaux libres et de leur bordure à végétation active (rizières, borgoutières) du fleuve Niger.

L'un des intérêts de l'image Météosat est d'offrir un « calage » des nuances de réflectance à travers tout le territoire : alors que les données photographiques des diverses scènes Landsat ne sont pas uniformément étalonnées sur une gamme unique de densité optique, l'image Météosat, en couvrant tout le territoire étudié par une seule scène, restitue la valeur relative des réflectances dans leur intensité réelle. Ceci permet de faire des comparaisons (certes peu précises à ce niveau) entre divers « objets géographiques ».

a) Les contours géologiques :

La réalité de la disposition en auréoles des formations géologiques du bassin des Iullemmeden apparaît : l'auréole cénomanienne et turonienne est un peu plus absorbante que les aires voisines ensablées ; la présence d'argiles (ou d'argilites) sur les plateaux du Tazerzaït contribue certainement à réduire leur réflectance de même que, vraisemblablement, certaines dispositions plus denses de la végétation.

La cuesta paléocène est fort peu visible : seules apparaissent les aires très absorbantes (lambeaux de plateaux, glacis et dépressions argileuses) de la région de Sessao et Mentès ; il est vrai que les aires d'émergence de la formation, un peu plus au sud-est (région de Chin Salatin), sont d'extension si limitée qu'elles peuvent ne pas être prises en compte. Dans la région de Chin Salatin, les argiles sombres qui bordent la cuesta et qui tapissent de grands bas-fonds à végétation dense et normalement absorbante, ne sont pas visibles non plus : la date d'enregistrement joue-t-elle ici un rôle ? Paradoxalement, c'est la vue d'avril 1979

(1) Une étude de l'Azawagh sur données Météosat numérique est en cours en 1985.

Figure 24 - Image Météosat, traitement photographique, canal visible, vue du 12.04.1979

(c'est-à-dire en fin de saison sèche, au moment où la végétation est la plus pauvre) qui paraît présenter quelques aires sombres alors que la vue d'octobre 1978, enregistrée après la même saison des pluies (considérée comme « normale ») n'en figure aucune. On peut cependant penser qu'en saison sèche, les contrastes de réflectance s'accentuent : les argiles des bas-fonds, même faiblement couvertes de végétation peu active, se marquent en sombre alors que leur voisinage sableux ou à alternance sables-argiles (les ergs réticulés) devient plus clair, leur végétation étant très peu marquante.

Plus au sud, la formation paléocène se confond avec celles du Continental terminal, plateaux cuirassés couverts partiellement de végétation absorbante, striés de couloirs sableux bien visibles.

Tout à fait au sud de la région des dallols, la végétation dense et absorbante, active pendant presque toute l'année, des latitudes sub-soudaniennes masque la plupart des contrastes et des nuances. Seuls les objets les plus absorbants, l'eau libre en fait (le fleuve Niger et les lacs) restent distincts.

Sur le plan géologique, plusieurs faits nouveaux apparaissent : ils concernent le massif de l'Aïr, un peu marginal par rapport à notre zone d'étude. Le massif tel qu'il est figuré sur les images Météosat présente nettement des nuances de réflectance : la partie médiane, relativement claire, est encadrée par deux secteurs nettement plus sombres. Le premier, à l'ouest, semble correspondre aux formations primaires · le second, à l'est et disposé en masses globuleuses, paraît correspondre aux formations volcaniques récentes et à certaines formations précambriennes. Il est possible que ces différences de réflectance soient liées à des formes d'érosion différentes dans des formations lithologiques plus ou moins dures, plus ou moins récemment mises en place : la largeur des vallées et des diaclases ensablées (comme le montrent les images Landsat) intervient sans aucun doute sur la réflectance de la tache élémentaire Météosat.

Il est à noter que la *forme* générale du massif telle qu'elle est figurée sur la carte géologique (Greigert et Pougnet, 1965) et telle qu'elle apparaît sur l'image Météosat, diffère sensiblement : sur les images Météosat les sables qui encadrent le massif de toutes parts paraissent avoir une extension beaucoup plus grande que sur la carte ; en particulier, ils sont très visibles, par leur réflectance élevée et par des structures parallèles apparemment éoliennes, dans tout le secteur qui sépare le massif de l'Aïr de ceux de l'Ahaggar et de l'Adrar des Ifoghas alors que la carte géologique ne mentionne pas cette couverture. Faut-il voir là un choix du géologue qui aurait favorisé les massifs anciens au détriment de la couverture quaternaire ? La précision de la figuration cartographique semble indiquer que la couverture sableuse aurait été bien mince et n'aurait pas gêné les observations (1). Serait-il possible que celle que montre Météosat ait une origine très récente ?

Au nord-ouest de l'Aïr, dans la région d'Edikel, apparaissent les lignes concentriques d'une structure circulaire que les cartes géologiques ne citent pas.

Plus intéressants pour notre propos car ils concernent de plus près les pays de l'Azawagh sont les objets linéaires nord-sud qui longent le massif de l'Aïr à l'ouest et les panaches sableux qui le débordent par le sud.

b) Des linéaments non expliqués :

Les quatre vues Météosat examinées présentent les mêmes linéaments parallèles et presque rectilignes entre le massif de l'Aïr et celui de l'Adrar des Ifoghas. Le plus long et le plus oriental d'entre eux commence au nord au niveau de l'Ahaggar et se prolonge vers le sud jusqu'à l'angle de l'Ader : d'après la carte géologique, une partie de son tracé paraît correspondre avec la limite entre la formation des *grès du Tegama* (Continental intercalaire) et la *série de Farak* (Cénomanien inférieur). Sur la carte de Greigert et Pougnet, cette limite est effectivement figurée de façon rectiligne mais en tiretés, suggérant que les auteurs ne sont pas sûrs de leur tracé ou que la raideur de celui-ci les a surpris...

L'orientation de ces linéaments peut être rapprochée de celle de la ligne de fracture qui traverse le bassin de l'Eghazer wan Agadez du nord au sud et est matérialisée par la résurgence de lambeaux des *grès d'Agadez* (Dabla, Tegiddan Tageyt) au milieu des *argilites de l'Eghazer* et par le compartiment d'Asawas. Cette fracture, plus orientale que les linéaments dont il s'agit ici, n'est pas identifiable sur les données

(1) Dans ces régions sahariennes et à l'époque de la réalisation de la carte (le début des années soixante), les moyens d'investigation *en profondeur* étaient tout de même limités...

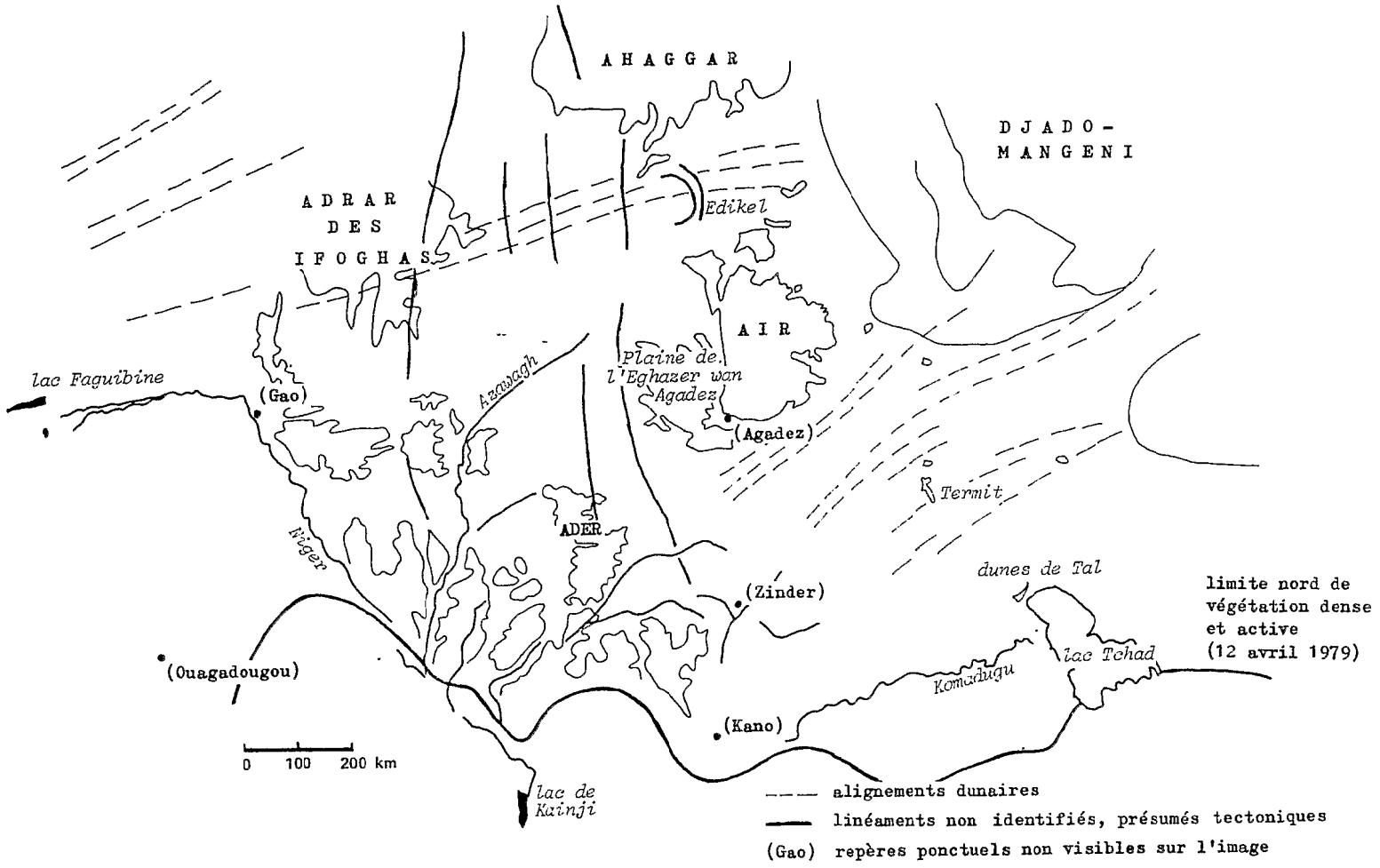


Figure 25 - Météosat. Croquis d'après la vue du 12/04/79

Météosat consultées. Mais ces linéaments auraient-ils une origine tectonique ? D'aussi vastes accidents (plus de huit cents kilomètres pour le plus long) auraient-ils pu échapper à l'examen attentif, sur le terrain et sur photographies aériennes, des géologues ? Ce ne serait pourtant pas la première fois que seraient mises en évidence sur les données spatiales, grâce à leur très grande taille et à leur rectilinéarité, des objets linéaires encore non discernés parce que ténus : une très faible différence de brillance (invisible sur le terrain ?) les rend seule perceptibles...

Peut-on rapprocher ces linéaments de ceux, de même direction semble-t-il, que nous avons relevés sur les images Landsat de l'Azawagh (scène 206-049 notamment) ? Nous ne possédons pour le moment aucun élément de réponse.

c) Les sables éoliens :

Enfin, le dernier élément mais non le moindre, est la mise en évidence sur les données Météosat des panaches de sables éoliens. On aperçoit nettement celui qui, issu du Ténéré et du Grand Erg de Bilma, vient mourir contre l'Aïr en le dépassant légèrement au sud, effleurant la falaise de Tigidit et la partie orientale du plateau de la Tadarast.

Alors que sur les données Landsat à 1/500 000 (compositions colorées) et à 1/250 000 (composition colorée améliorée de l'IGN) ces formations éoliennes apparaissent plutôt comme des dunes isolées, très allongées, on voit nettement ici qu'elles appartiennent à un vaste ensemble dont elles constituent l'avancée extrême vers l'ouest, déviée par le sud le long du massif montagneux.

Dans les zones qui sont situées au nord de l'Azawagh, les flux éoliens sont bien marqués par les textures parallèles qui évoquent l'organisation dunaire. L'orientation la plus fréquemment rencontrée est nord-est sud-ouest (celle de l'harmattan actuel) ; mais on rencontre aussi dans l'Adrar des Ifoghas une orientation perpendiculaire, de sens apparemment sud-est nord-ouest, matérialisée sur l'image par les « ombres » éoliennes à l'abri d'un petit massif montagneux isolé (région de l'oued Tirhahart en Algérie). S'agit-il d'une direction contemporaine de la précédente? D'un effet de détournement du vent entre Adrar des Ifoghas et Ahaggar ? Les linéaments dont nous avons parlé au paragraphe précédent seraient-ils à rapprocher d'une direction éolienne ?

La direction nord-sud est aussi celle d'un alignement dunaire situé à proximité d'In Abangharit, noté sur la carte géologique comme *dunes vives* : les images Météosat (non plus que les images Landsat, nous le verrons plus loin) ne restituent pas nettement cet erg ; elles ne restituent d'ailleurs pas non plus celui qui est figuré sur les cartes au nord des plateaux de Tazerzaït, orienté approximativement est-ouest cette fois ; pourtant, on voit clairement sur les données Météosat la tache très claire correspondant aux réflectances très élevées des dunes vives du *Désert de Tal,* auprès du lac Tchad... Doit-on en conclure que les *dunes vives* d'In Abangharit se sont recouvertes de végétation ?

En restituant les figurations radiométriques des pays de l'Azawagh dans leur ensemble et dans leur voisinage proche et lointain, les données Météosat complètent très utilement les données Landsat sur les formations de surface et sur la végétation. Comparées entre elles, les données Météosat sont susceptibles de fournir des indications, générales certes mais précieuses, sur l'évolution inter-annuelle et saisonnière de la végétation au niveau zonal. Nous n'avons pas entrepris cette étude mais nous avons utilisé les données Météosat dont nous disposions pour compléter l'étude des aspects radiométriques de l'évolution saisonnière de la végétation (cf. Troisième Partie, *La Végétation,* chapitre 2.4 p. 177).

4.2. UNE ETUDE PARTIELLE SUR SIMULATION SPOT

Une série de prises de vues de simulation des enregistrements Spot a été faite en divers points de la République du Niger pour donner des éléments expérimentaux de solution aux préoccupations touchant les milieux urbains, les milieux inondables, les matériaux de surface utiles... Cinq enregistrements ont été effectués le long de l'axe routier Agadez-Zinder afin de « voir si les données Spot sont en mesure de résoudre les

problèmes soulevés par une étude géologique et géotechnique de tracé routier (...) et principalement celui de la recherche de matériaux pour les chaussées » (définition du projet, Spot-Image, 1980).

Dans cette série, l'enregistrement le plus septentrional, qui concerne une aire très proche de la ville d'Agadez, offrait pour nous l'intérêt de se situer à l'intérieur de notre périmètre d'étude et plus précisément à l'intérieur de celui de la scène 204-048 Landsat, qui couvre le bassin de l'Eghazer wan Agadez.

Ces « données Spot » sur le sud d'Agadez couvrent une aire qui mesure 21 kilomètres sur 7 (voir figure 21). La résolution au sol est de vingt mètres ; l'enregistrement est multispectral à trois canaux, plus un canal panchromatique.

L'enregistrement a été effectué en janvier 1981, soit au milieu de la saison sèche après une saison des pluies qualifiée de « normale ».

Les données ont été principalement utilisées sous leur forme numérique. Les données photographiques ont été consultées pour le repérage, sous forme de tirages noir et blanc sur papier des trois canaux (le canal panchromatique n'a pas été utilisé) à l'échelle 1/100 000 environ.

Le périmètre de la simulation couvre partiellement une région de plateaux caillouteux plus ou moins patinés. La patine semble avoir été mise en place après la formation ou la mise à nu des regs. Elle paraît plus intense sur les corniches et sur certaines pentes. D'après les photographies aériennes, il semblerait qu'elle apparaisse plus nettement sur les pentes qui tournent le dos à la direction du vent, celles par conséquent qui sont abritées de l'ensablement direct : la patine n'aurait donc pas une importance moindre, mais le saupoudrage de sable la masquerait.

Les regs sont traversés par la vallée de Tyeral, de direction nord-sud, sableuse et qui abrite de la végétation arborée ; tout autour, des vallées nombreuses constituent un réseau très ramifié.

L'examen des photographies aériennes met en évidence l'extrême hétérogénéité du milieu : le réseau hydrographique y apparaît très dense ; les sables s'y marquent en clair sur le fond sombre. Les plateaux eux-mêmes sont striés de couloirs sableux orientés est-ouest ; on relève par endroits la présence de barkanes. Ces ensablements — qui paraissent récents et vifs - correspondent à l'avancée extrême vers l'ouest des sables du Ténéré.

La plus grande dimension de certains des « objets géographiques » (blocs patinés, largeur des vallées ensablées, barkanes) n'excède pas quelques mètres. Les données Spot restituent la réalité du terrain en la généralisant par superposition du maillage de sa tache élémentaire. L'hétérogénéité du milieu, telle qu'elle est visible sur les données Sport est intermédiaire entre celle des photographies aériennes et celle des données Landsat.

On peut considérer que les données Spot ont été exploitées *sans vérité-terrain* car l'aire couverte par la simulation n'a pas été parcourue dans le détail (seule la vallée de Tyeral nous est connue) ; l'absence de vérité-terrain s'avère beaucoup plus gênante dans un travail à échelle relativement grande sur des données à définition élevée (Spot) que dans un travail à échelle plus petite sur les données à définition moindre (Landsat par exemple).

On a donc travaillé sur les données Spot *comme en terrain inconnu* mais en cherchant à conserver la finesse des détails figurés autant qu'en cherchant le moyen de différencier ou de rapprocher les unités restituées *avant de les interpréter*.

Différences et similarités ont été recherchées dans trois aspects des rapports radiométriques :
- la valeur radiométrique relative dans les trois canaux,
- la texture des unités,
- la nature du contact avec les unités voisines.

Ces critères de différenciation peuvent être efficacement visualisés par les courbes radiométriques tracées le long d'un axe (ou de plusieurs axes) choisis pour leur intérêt.

La figure 26 en présente un exemple. L'axe correspond à une *ligne,* matérialisée sur la carte radiométrique de la page 115 par ses amorces TT'. On a superposé les courbes de chacun des trois canaux et on a construit trois courbes :

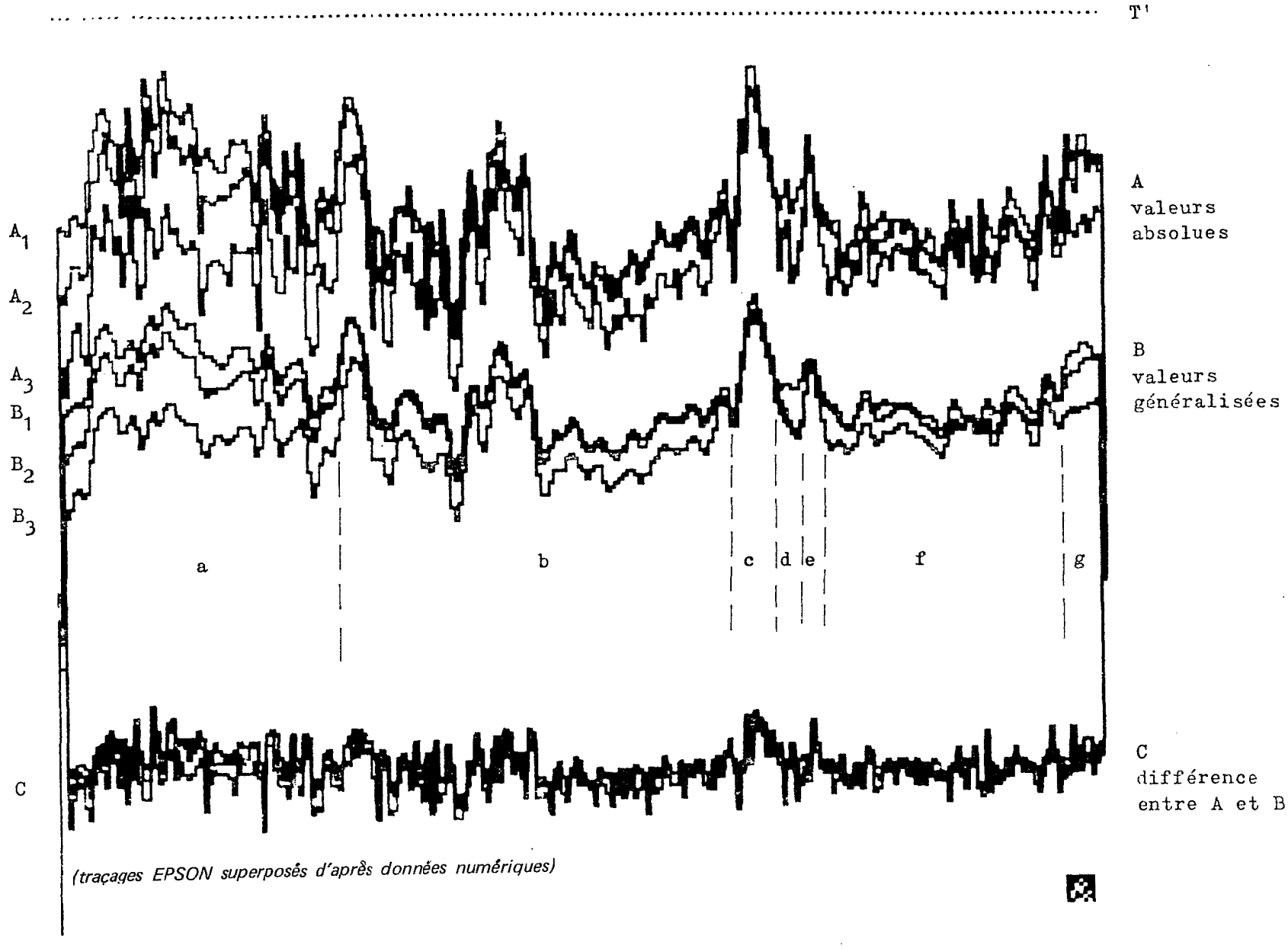


Figure 26 - Simulation spot, courbe des valeurs radiométriques, axe TT'

– A1, A2 et A3 : valeurs radiométriques de chacun des pixels de la ligne dans les canaux 1, 2 et 3 ;
– B1, B2 et B3 : les mêmes valeurs radiométriques *généralisées* (1) ;
– C1, C2 et C3 : courbes des différences entre les courbes A et B.

Les courbes A et C mettent en évidence le niveau d'homogénéité en présentant les contrastes entre valeurs des pixels voisins : on voit par exemple que le segment a est nettement plus hétérogène que les autres segments de la courbe, il est constitué d'une succession serrée de pics et de fossés. Les nuances d'homogénéité peuvent servir à évaluer la réflectance — partant les nuances de réflectance — des éléments composant une texture.

Sur la figure présentée et à cause de la superposition des courbes, C1, C2 et C3 ne sont pas distinctes.

Les courbes B, simplifiées, rendent compte de la tendance générale des valeurs et facilitent la comparaison des valeurs des trois canaux.

Sur l'exemple qui suit, on relève ainsi sept segments de courbe dans lesquels les valeurs radiométriques des trois canaux ont des rapports différents :

a : $1 > 2 > 3$ dans des valeurs très variables,
b : $1 = 2 > 3$ dans des valeurs très variables,
c : $1 > 2 = 3$ dans des valeurs élevées,
d : $3 > 1 = 2$ dans des valeurs élevées,
e : $2 = 3 > 1$ dans des valeurs élevées,
f : $2 > 1 > 3$ dans des valeurs modérément variables,
g : $3 > 2 > 1$ dans des valeurs peu variables.

Les segments a, b et f peuvent être subdivisés en « sous-segments » selon l'intensité de réflectance et selon le « relief » des pics et fosses qu'ils contiennent.

On considère alors que chaque segment ou sous-segment correspond à une unité différente, partant à un thème ou à un faciès de thème différent.

Segments et sous-segments peuvent présenter des analogies : a, b et c d'une part, d et g d'autre part ; e et f ne peuvent être regroupés.

On peut aussi rapprocher entre eux segments et sous-segments d'après l'intensité de contraste avec le voisinage : les pics des segments a, b et c différents du pic modéré e ; les fosses de a et b...

En fait, les courbes restituent graphiquement, de façon linéaire, une composition colorée ou son équivalent, qui peut être analysée de la même façon que les vraies compositions colorées. Elles ne restituent pas l'extension géographique d'une unité mais elles proposent des détails qui peuvent contribuer à son interprétation (2). Dans une certaine mesure, l'extension peut être restituée en construisant plusieurs courbes selon des axes différents (lignes, colonnes et axes obliques).

Dans le cadre de notre travail, les données de la simulation Spot présentent un inconvénient majeur, lié à la procédure même de « simulation » : elles couvrent une aire trop limitée pour être utilement comparée aux autres données de télédétection : photographies aériennes et images Landsat. Les lignes qui suivent abordent néanmoins quelques aspects comparatifs, mais il faut savoir qu'ils n'ont aucun caractère péremptoire ni réellement représentatif.

On peut aisément comparer les données Spot (figure 28 de la page 115, traçage dans le canal 2 et photo couleur de la figure 73) avec la photographie aérienne (couverture 1980 NE 32 II, 123) sur le même territoire. La composition colorée numérique Spot apporte certes des informations importantes grâce à la

(1) Les courbes A ont été généralisées par lissage, effectué sur trois pixels affectés chacun du coefficient 1.
(2) Les courbes de la page 111 et une autre, voisine, sont analysées en termes d'interprétation thématique dans la troisième partie, page 147.

Figure 27 - La vallée de Tyeral (Sud d'Agadez), photographie aérienne IGN 1980 1/50 000

restitution multispectrale. Mais ces informations n'ont pas paru plus nombreuses ni plus aisément interprétables *sur le plan thématique* que les photographies aériennes. Celles-ci restituent la réalité du terrain en vraie grandeur et chaque objet géographique est directement identifiable : dunes, arbres, rochers... grâce à la finesse de définition (1) et grâce à la stéréoscopie. Cette restitution *des objets* (et non pas des plages de radiométrie qui leur correspondent) permet une interprétation directe et instantanée.

En revanche, la restitution en plages radiométriques met ici en évidence, davantage que la photographie aérienne, des contrastes qui attirent immédiatement l'attention : c'est le cas notamment de la limite rectiligne qui sépare une aire à forte réflectance d'une aire à faible réflectance et qui barre la vallée du Tyeral : il reste cependant possible (mais non prouvé) que le contraste ait été accentué par la disparition récente d'éléments à réflectance basse (les arbres ?) lors de l'enregistrement Spot.

Sur l'aire de la simulation, on ne peut guère comparer les données Landsat et les données Spot : le milieu est à l'évidence trop hétérogène et constitué d'éléments trop ténus pour qu'ils soient intégralement restitués par Landsat (2) ; la finesse du réseau hydrographique apparent disparaît, seuls subsistent les troncs principaux, ce qui donne une idée incomplète de sa réalité ; les stries de sable disparaissent aussi, elles ne sont conservées que là où elles sont « grossies » par leur superposition au réseau hydrographique. Par contre, Landsat montre que le panache sableux qui barre l'ensemble du secteur n'est pas homogène, qu'il est plus large au sud. La vallée de Tyeral, sableuse et à la ligne de végétation bien marquée, reste très visible mais la « barre » de sable, si visible sur Spot, ne l'est plus ici.

Il va sans dire que ce n'est que lorsque le système Spot sera réellement opérationnel que l'on pourra comparer sur pièce son efficacité et faire le bilan de son apport aux autres données de télédétection : la répétitivité associée à la stéréoscopie en feront sans doute un outil complémentaire – sinon concurrentiel de la photographie aérienne dont il paraît plus proche qu'il ne l'est des données Landsat.

(1) Rappelons que les émulsions photographiques des photographies aériennes actuelles ont un pouvoir résolvant de 150 lignes par millimètre, ce qui permet *théoriquement* de restituer, à l'échelle 1/50 000 par exemple, des objets au sol qui ont une taille de l'ordre du centimètre (M.C. Lortic, 1980).

(2) Nous n'avons pu comparer les *données numériques* de l'image Spot aux *données numériques* de l'image Landsat car sur le périmètre de la simulation, l'image Landsat du 12 janvier 1976 présente une couverture nuageuse et des ombres gênantes.

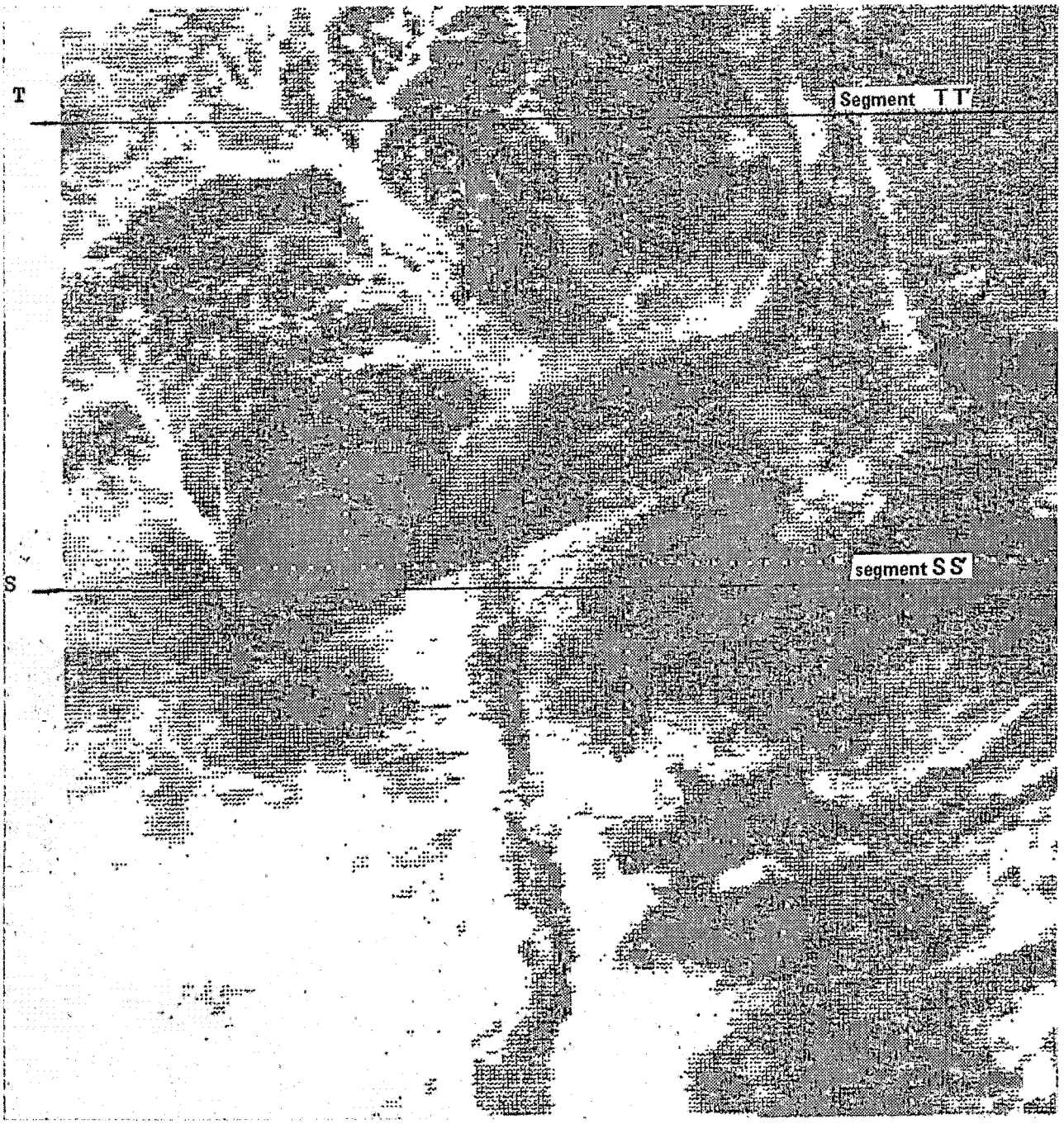


Figure 28 - Simulation spot, traçage EPSON en teintes de gris, canal 2

Troisième partie

LES RAPPORTS ENTRE IMAGE ET PAYSAGE

L'examen des données de télédétection spatiale a été focalisé sur quatre familles de thèmes, choisies parce qu'elles offraient de l'intérêt à la fois pour les archéologues et pour les géographes.

1. *Les formations de surface :* nous entendons par là la nature lithologique et granulométrique du terrain en surface : sables remaniés et non remaniés, argiles, regs, roches affleurantes. Ces diverses formations ne portent pas le même type de sites archéologiques : certaines sépultures se rencontrent en grande majorité sur les regs ; la plupart des sites néolithiques se trouvent sur telles dunes ; les ensablements très récents peuvent masquer ou au contraire découvrir des vestiges...

Par ailleurs la nature des formations de surface permet de reconstituer en partie le milieu correspondant aux vestiges découverts : terrains plus ou moins meubles et plus ou moins favorables à la végétation en phase sèche, aires considérées comme répulsives, contacts entre milieux différents offrant des ressources complémentaires favorables aux installations humaines...

Dans un milieu actuellement sec, l'étude des formations de surface et ce qu'on peut en déduire sur les capacités du terrain à retenir l'eau introduisent à l'étude de la végétation : celle-ci sera presque toujours associée à celle des formations de surface.

2. *La végétation :* il n'est guère douteux que les formations végétales actuelles du bassin de l'Eghazer wan Agadez et de la partie nord des pays de l'Azawagh n'ont que de très lointains rapports avec les formations végétales des périodes pluviales qui ont vu se développer, il y a 4 à 5 000 ans, des civilisations sédentaires dites néolithiques et post-néolithiques dans le sud du Sahara. Les recherches qui ont été faites sur les caractères climatiques du dernier pluvial (Maley 1981) citent plutôt des régimes pluviométriques très différents des actuels régimes tropicaux, une association de pluies d'été et de pluies de saisons intermédiaires, fines et accompagnées d'une forte nébulosité. La végétation « ancienne » devait donc être très différente de la végétation actuelle en ce qui concerne les essences, les associations, la répartition sur le territoire et la densité des couverts ; les reliques botaniques que l'on rencontre actuellement dans le massif de l'Aïr et sur sa bordure ouest *(Acacia albida, Anogeissus leiocarpus, Hyphaene thebaica)* peuvent témoigner de formations anciennes (de la période pluviale néolithique) aussi bien que de formations plus récentes et plus nettement tropicales et avoir pour origine les petites périodes « humides » plus récentes (Xe - XVe siècles, XVIIIe siècle).

Pour les habitants actuels, les nomades pasteurs, la végétation constitue la ressource de base, quasi exclusive par l'intermédiaire de l'alimentation du bétail, et parce qu'elle fournit tous les matériaux et ustensiles de la vie quotidienne que les animaux ne fournissent pas : une partie du mobilier de la tente, ses piquets, voire la tente elle-même (les tentes en nattes des Touaregs Kel Aïr) et l'outillage domestique (Bernus 1981).

La répartition, la densité, les indices de dégradation de la végétation sont donc essentiels.

3. *L'hydrographie :* l'hydrographie a un grand intérêt, à la fois pour l'étude des milieux actuels et des milieux anciens et pour l'étude de leur évolution.

Il est important que l'archéologue ait une idée des « paysages hydriques » et de la nature des ressources en eau : à proximité de l'eau se trouvent les facilités d'abreuvement pour les groupes humains et pour leurs troupeaux, les ressources alimentaires végétales : pêche, chasse, cueillette, l'agriculture et les possibilités

d'irrigation. Mais peuvent s'y rencontrer aussi les vecteurs pathogènes, les animaux nuisibles et dangereux, les insectes désagréables, les dangers d'inondation... La nature des ressources en eaux de surface n'est donc pas indifférente : cours d'eau à écoulement permanent et régulier, marécages, lacs et mares, zones inondables...

4. *La présence humaine :* bien que notre étude soit orientée vers les milieux naturels, il aurait été fâcheux de négliger les milieux humanisés actuels dans un pays où les informations sur l'occupation du sol sont fragmentaires et souvent périmées.

Il n'existe pas, au Niger ni au Mali, de cartes d'utilisation du sol aux échelles supérieures à 1/2 500 000 sauf sur certains secteurs méridionaux, qui ont fait l'objet de programmes de développement agricole précis. Il n'était donc pas sans intérêt de rechercher les traces de la présence humaine pour en étudier les variations par rapport aux connaissances antérieures et, secondairement, pour tester l'outil Landsat dans un domaine dans lequel les décisions nationales sont particulièrement attentives.

1. LES FORMATIONS DE SURFACE

Dans les pays de l'Azawagh, les formations de surface peuvent être divisées en trois groupes, selon leur cohérence et leur rugosité :

— *les sables,* de loin les plus représentés en surface, présents partout en aires continues plus ou moins vastes ; ils sont d'origine éolienne, fluviatile ou colluviale ; ils sont meubles, non cohérents, facilement mobilisés par les agents de transport, vent et eau. Aisément pénétrés par l'eau, ils favorisent la végétation herbacée et ligneuse pérenne.

— *les argiles,* très représentées dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez dont elles constituent une grande partie, nettement moins présentes dans les autres pays de l'Azawagh et dans les dallols. Elles sont meubles, cohérentes, non mobilisables par le vent sauf si elles sont piétinées et pulvérulentes en surface ; elles ne laissent guère pénétrer l'eau et portent une végétation essentiellement annuelle, souvent dense quand les conditions hydriques sont favorables. Sauf exception, on les trouve en position basse : plaines, dépressions fermées, certains fonds de vallées.

— *les formations rugueuses,* regs, éboulis et roches nues, sont constituées de blocs centimétriques, décimétriques ou métriques ; elles sont souvent composées d'éléments hétérogènes ; les obstacles retiennent fréquemment des sables éoliens piégés au vent et sous le vent. Les formations rugueuses se trouvent souvent en position haute et sur les pentes : plateaux et talus, massifs rocheux, éboulis ; les blocs jouent un rôle de protection des formations meubles ou fragiles sous-jacentes.

1.1. LES SURFACES MEUBLES NON COHERENTES : LES SABLES

Sur image Landsat les sables sont aisément identifiables :

— par leur réflectance, généralement élevée à très élevée dans tous les canaux ;

— par la structure de l'image : les hautes réflectances occupent les fonds de vallées — formes linéaires caractéristiques — où s'étendent en larges surfaces continues ;

— par la texture des unités sableuses : globulaire des grandes dunes récentes, en croissants des barkanes, plus ou moins finement ridée des ergs orientés ;

— par la végétation qu'ils portent, abaissant les réflectances dans les canaux 4 (végétation herbacée principalement) et 5 (végétation arborée).

Les sables les plus clairs sont les sables nus, très réfléchissants dans tous les canaux sans que l'un d'eux domine. C'est le cas notamment des sables des talus sous les falaises (falaise de Tigidit, bordures du Dallol

Boso sous les plateaux du Continental terminal), qui sont des sables grossiers, colluviaux, issus de la destruction des grès situés immédiatement au dessus d'eux ; ils sont constamment remaniés pendant la saison des pluies par le ruissellement et par l'impact des gouttes de pluie ; ils ne portent qu'une végétation très contractée le long des axes d'écoulement les plus stables sous forme de touffes d'herbe de petit diamètre (20 à 30 cm au plus au pied de la falaise de Tigidit à Tadben), très espacées, apparemment non marquantes au niveau de la tache élémentaire Landsat.

Réflectance et structure se combinent pour faire apparaître les sables des vallées, particulièrement clairs par rapport au voisinage ; comme précédemment ces sables sont dépourvus de végétation.

Dans la région septentrionale de la scène 204-048, la grande vallée de Sekiret, non fonctionnelle actuellement est bien marquée par les hautes réflectances de ses sables considérés comme fluviatiles et peu remaniés par le vent au milieu des sables présumés éoliens des environs, disposés en masses non organisées. Dans le massif de l'Aïr les vallées et les grandes diaclases sont particulièrement marquées par le contraste entre les sables des dépressions linéaires, très clairs, et les roches plus ou moins vernies qui les encadrent. La dune d'Azelik se distingue nettement des argiles et des regs environnants sur toutes les images de la scène 204-048 : l'unité de réflectance élevée la dessine parfaitement et les vallées sableuses qui en sont issues sont particulièrement visibles (figure 19).

Ces sables alluvionnaires ou colluvionnaires ont une genèse de mise en place différente des sables éolisés environnants. Ces derniers sont plus anciennement en place, souvent plus ou moins rubéfiés (1) et, dans le cas des recouvrements transportés par le vent, ils ont une origine lithologique plus lointaine, différente des alluvions « locales » arrachées à l'Aïr.

Les sables qui couvrent la majeure partie des régions de l'Azawagh et surtout leur partie centrale sont d'origine éolienne, remaniement de sables « locaux » ou peu transportés aussi bien qu'accumulation considérable en vastes ensembles construits.

De façon générale, ces sables sont actuellement fixés : les transports affectent de très petites quantités sur de courtes distances et les accumulations actuelles sont de petite taille, généralement inférieure à celle de la tache élémentaire Landsat et ne constituent pas d'ensembles organisés. Il faut néanmoins nuancer ce schéma : on rencontre dans la partie sud-est du bassin de l'Eghazer wan Agadez de petites dunes allongées est-ouest, très réfléchissantes dans tous les canaux, disposées irrégulièrement au nord et au sud de la falaise de Tigidit, dans sa partie orientale ; ce sont les dunes dénudées, sinon *vives* ou mobiles à proprement parler, qui correspondent à l'extrême avancée vers l'ouest du panache du Ténéré et du Grand Erg de Bilma. Il est probable que la sécheresse prolongée, associée à un renforcement des vents sur la région (Bernus, Fauck et Peyre de Fabrègues, 1983 ; communications orales de F. Paris, 1983, 1984) remobilise depuis quelques années des sables autrefois fixés : des traces de cette remobilisation ont été vues sur le terrain sous la forme de dunes vives à Kerbubu en 1981 ; elles sont distinctes sur photographies aériennes (IGN 1/50 000 1981 au sud d'Agadez) sous forme de barkanes.

Mais dans la grande majorité des cas, les formations sableuses sont recouvertes d'une végétation diversement organisée selon la pente et la latitude. On peut alors, selon le type de couverture végétale, distinguer sur les compositions colorées Landsat diverses unités sableuses colorées en jaune, orangé et brun-rouge, ce qui correspond à des absorptions élevées dans les canaux 4 et 5 ; notons que ces unités traduisent souvent davantage des inégalités de pluviométrie que des différences péremptoires dans les formations sableuses, sauf exceptions que nous verrons plus loin à propos des ergs réticulés.

Le plateau de la Tadarast, qui s'étend au sud de la falaise de Tigidit est recouvert d'un manteau sableux de quelques mètres d'épaisseur (Greigert et Pougnet, 1967), qui ne masque pas les pointements rocheux nombreux dans la partie nord. Aucune texture n'apparaît sur la composition colorée Landsat du

(1) A Irayen, dans la falaise de Tigidit, on peut voir distinctement les sables éoliens de la masse ténéréenne, faiblement rubéfiés, « s'écouler » sur la berge du kori, recouvrant les sables fluviatiles très blancs. Les données photographiques de Landsat ne restituent pas le phénomène mais il est possible que les données numériques en rendent compte.

12 janvier 1976, scène 204-048 : pas d'organisation visible non plus sur le terrain ; mais dans la partie orientale du plateau et sur la vue du 5 février 1975 scène 205-048, on repère trois sortes de couvertures sableuses : à l'est de la vue, la couverture des sables de la Tadarast proprement dite, non organisée, de réflectance élevée dans tous les canaux, implique une végétation peu abondante sauf dans les vallées ; plus à l'ouest, une seconde unité est nettement délimitée de la précédente par une ligne droite (1) et par une absorption plus élevée dans le canal 5, impliquant une densité de végétation plus élevée. Plus à l'ouest, apparaît une formation sableuse organisée, mise en évidence par une texture mouchetée dont les points correspondent à une forte absorption dans les canaux 5 et 7, encadrés par un environnement plus réfléchissant : dans tous les cas, les différences végétales traduisent des différences dans le mode de couverture sableuse.

Au fur et à mesure que l'on progresse vers l'ouest et que l'on pénètre dans les grandes aires sableuses des recouvrements quaternaires du centre de l'Azawagh, apparaissent des types variés de texture des unités sableuses : longues dunes allongées sur plusieurs dizaines de kilomètres en larges ondes de l'Azawagh nord ou courtes rides contournées des environs du massif d'Agalamlam... Ces *structures* (sur le terrain) et ces *textures* (sur image Landsat) correspondent à divers types d'organisation des édifices sableux et des bas-fonds.

La texture sur l'image Landsat peut présenter des composants contrastés : sables réfléchissants, argiles de bas-fonds absorbantes ; plus souvent, les contrastes sont doux, les rides se marquent par une faible accentuation de l'absorption dans le canal 5 : simple différence de densité végétale, entre haut et bas de pente, vraisemblablement soulignée par l'angle d'incidence des rayons lumineux, perpendiculaires au sol sur les pentes tournées vers l'est, parallèles au sol sur les faces opposées.

Sur l'image du 15 janvier 1976 de la scène 207-049 apparaît une autre texture des unités sableuses éoliennes : ce sont les globules nettement marqués sur le fond très sombre des aires rocheuses ou caillouteuses. Ils correspondent à de hautes et larges dunes côniques, surimposées par endroits à de plus anciens massifs dunaires. L'examen attentif de ces grandes dunes fait apparaître leur ombre projetée à l'ouest (vue prise à 9 h 28 GMT). De grandes dunes semblables se trouvent, couvertes de végétation, dans une situation nettement plus méridionale, dans la région de Tchin Tabaraden (scène 205-049 vue du 18 février 1976).

Parmi les formations sableuses éoliennes, on fera une mention spéciale pour la dune qui borde la rive droite de la vallée de l'Azawagh dans le secteur d'Agalamlam : cette longue dune se marque sur l'image Landsat (scènes 206-048 et 206-049) par une mince ligne très réfléchissante dans tous les canaux ; la même formation se rencontre sur la rive droite de l'Azar à la même latitude (scène 206-048) ; la haute réflectance dans tous les canaux suggère une dune dénudée et peut-être une origine récente : remaniement local des dunes bordant les deux vallées ? influence fluviatile au cours d'un épisode d'écoulement ? Ces hypothèses concordantes sont confirmées par l'examen des données Landsat *numériques* (vue du 30 septembre 1978) : des formes barkaniques caractéristiques y sont apparentes, en alignements méridiens de croissants disposés les uns au-dessous des autres et dont les cornes sont orientées vers l'ouest.

Dans les aires méridionales (au sud du 16e parallèle) la végétation et les traces d'occupation humaine troublent, sur les images Landsat, les textures qui pourraient faire soupçonner des édifices et des ensembles éoliens. Les sables restent cependant perceptibles grâce à leurs réflectances élevées : c'est le cas des espaces récemment défrichés du nord de la scène 206-050 (vue du 26 mars 1976) et des terroirs en étoile, des scènes 206-050 et 206-051. Sur les vues du 26 mars 1976, ces terroirs présentent une forte absorption dans le canal 4 uniquement : à cette époque les champs sont en cours de préparation pour la saison agricole, c'est-à-dire dénudés (c'est le sable qui « signe ») ou faiblement couverts par des chaumes desséchés subsistant de l'année précédente. Ils font contraste avec l'auréole plus éloignée du village, des parcelles en jachère, des « champs de brousse » plus tardivement préparés et de la brousse proprement dite, exploitée mais non mise en culture.

(1) Cf p. 107, à propos des données Météosat.

Notons sur l'image en composition colorée de la scène 206-051, vue du 26 mars 1976, les traces de l'erg le plus méridional à une latitude proche de 13°, sous-forme de minces bandes très réfléchissantes orientées est-ouest. Cet erg est plus distinct dans les régions situées hors de notre territoire d'étude, sur les images de la région de Niamey par exemple (scène 207-050 non étudiée ici).

En revanche les « dunes vives » notées sur la carte géologique (Greigert et Pougnet, 1965) dans la région d'In Abangharit ne sont guère visibles : la faute en est peut-être à la mauvaise qualité des enregistrements sur les aires concernées, embrumées et ennuagées ; sur la scène 205-048, vue du 5 février 1975, elles n'apparaissent que grâce à une orientation caractéristique nord-sud, et la réflectance générale ne semble pas correspondre à une réelle dénudation.

Il est à noter que certaines surfaces dunaires présentent, à l'observation du terrain, des « indurations » de surface par endroits, des espaces dénudés sur lesquels les grains de sable sont agglomérés avec des particules argileuses, en « croûte » minces et fragiles. Les vents de saison sèche, par les grains de sable qu'ils transportent au ras du sol, détruisent ces « croûtes », ce qui nous laisse penser qu'elles se forment en saison des pluies, certaines conditions de ressuyage rendant cohérentes les particules de surface (Poncet et al. 1984). La cohérence peut être créée par la présence de particules argileuses abondantes, amenées sur les surfaces dunaires depuis de grandes distances par les vents de poussière nombreux au cours de la saison sèche.

Ces « croûtes » présentent, sur le terrain, une couleur légèrement plus foncée et plus rougeâtre que les sables sur lesquels elles se trouvent. Il est possible qu'elles affectent la réflectance générale des sables.

Extrêmement fugitif car variablement influencé par le vent et par le piétinement, ce phénomène ne peut guère être saisi sur les données spatiales, mais il est possible qu'il abaisse, là où il s'étend, la réflectance des sables.

Sur les images de simulation Spot, les sables présentent des caractéristiques radiométriques très voisines de ce qu'elles sont sur les images Landsat et ils offrent les mêmes types de contraste avec les unités voisines.

1.2. LES SURFACES MEUBLES COHERENTES : LES ARGILES

Les surfaces issues des argilites et les surfaces argileuses se distinguent nettement des surfaces sableuses, dans le paysage et sur les images spatiales.

Sur le terrain, elles se distinguent par la granulométrie et la cohérence des éléments de surface, surtout par leur *couleur*. Alors que les sables sont meubles et non cohérents, facilement façonnés en formes reconnaissables et de couleur très claire, les formations argileuses ou comprenant une forte proportion d'argiles sont toujours cohérentes, meubles ou dures, de teinte sombre dans presque tous les cas : brun rouge, gris, gris foncé.

Sur les images spatiales, les aires argileuses se distinguent tout aussi nettement des sables : elles présentent des réflectances très basses, notamment dans les canaux 5 et 7.

Dans les zones septentrionales, particulièrement dépourvues d'eau de pluie, la présence des éléments argileux empêche l'infiltration en profondeur ; l'eau ruisselle sans pénétrer sous la surface, la capacité de rétention de l'eau est très faible : de façon générale, les aires argileuses portent pendant la saison sèche une végétation plus contractée que les aires sableuses à quantité de pluie égale. Pendant la saison des pluies au contraire, l'eau y est disponible pour une plus grande variété de plantes annuelles. La végétation se marquant principalement dans les canaux 4 et 5 et les argiles étant absorbantes dans le canal 5, on voit que les formations végétales n'y seront guère distinctes...

L'ensemble des argilites (1) et des argiles le plus nettement visible est celui du bassin de l'Eghazer wan Agadez, parfaitement distinct sur Météosat, par exemple. En fait, les basses réflectances du bassin de l'Eghazer wan Agadez sont engendrées à la fois par des formations proprement argileuses meubles, relativement homométriques et fines et par des formations de type « regs », hétérométriques, associant des granulométries fines et des granulométries centimétriques ou décimétriques, souvent recouvertes de vernis noirs.

Parmi les argiles du bassin, on rencontre des surfaces kaoliniques et des surfaces montmorillonitiques.

1.2.1. **Les montmorillonites** du bassin de l'Eghazer sont des formations du Quaternaire récent, déposées au cours d'épisodes humides par des cours d'eau lents, régulièrement alimentés ou dans des marécages. Les traces de ce réseau hydrographique sont encore parfaitement visibles, certains tronçons sont encore fonctionnels quelques jours par an. Les montmorillonites occupent tous les fonds de vallées qui ne sont pas sableux (Bernus et Poncet, 1984) et d'anciens lacs. Leur répartition correspond au réseau hydrographique fonctionnel de la dernière grande période pluviale, soit approximativement la période Néolithique de la région (4 000 ou 5 000 B. P.).

Les montmorillonites sont des argiles de teinte très sombre, presque noire. Elles présentent en saison sèche des fentes de retrait géantes de 70 cm de profondeur et de 15 cm de largeur et une surface pulvérulente et bombée. Elles absorbent une grande partie de la lumière et présentent des réflectances extrêmement basses dans tous les canaux notamment dans le canal 7 avec des variations locales ; ces variations vont dans le sens d'une inversion de l'absorption maximale, entre les canaux 7 et 5 ; c'est le canal 5 qui devient alors le plus absorbant, surtout à la périphérie des aires à absorption maximale. Ces variations pourraient être dues soit à une réduction de la taille des fentes de retrait (on aurait, sur les périphéries des bas-fonds, des montmorillonites moins pures, davantage mélangées de kaolinites ou d'illites) ; soit à des restes de végétation subsistant en saison sèche ; soit à une variation de pulvérulence de surface et de couleur, liée au mode de ressuyage après la dernière pluie.

Leur réflectance très basse et la forme distinctement « fluviale » des unités *montmorillonites* permettent de les identifier aisément sur image Landsat.

1.2.2. **Les kaolinites**, constituent l'autre type de surface argileuse de l'Eghazer wan Agadez ; elles sont plus ou moins mêlées de sables et s'étendent en vastes surfaces planes ; elles présentent des réflectances généralement moyennes, variables selon les circonstances occasionnelles ou locales.

Ni la forme des unités ni la réflectance ne permettent d'identifier aisément les aires à kaolinites des autres types de surface couramment rencontrés dans leur voisinage.

Sur l'image en composition colorée du 12 janvier 1976 de la scène 204-048 puis sur image numérique, nous avons tenté de déterminer les caractéristiques radiométriques communes aux aires à kaolinites, sans grand succès... Mais cet insuccès même nous a obligée à chercher les causes des variations de faciès et de les proposer ici en rappelant que les observations de terrain ont eu lieu plusieurs années après l'enregistrement Landsat, c'est-à-dire que l'état des surfaces observées pouvait avoir changé...

Il semble que l'un des principaux facteurs de variation de faciès radiométrique soit l'état de la pellicule de surface, c'est-à-dire des quelques dixièmes de millimètres qui sont en contact avec l'atmosphère. C. Valentin (1985) a mis en évidence le rôle de la violence de la dernière pluie, de la granulométrie et de la vitesse de ressuyage dans la disposition de la pellicule superficielle ; il est probable que le rôle de la pente — même très faible — n'est pas négligeable, non plus que de la présence d'éléments étrangers : sables, particules organiques...

Selon les circonstances, les éléments de surface peuvent s'organiser en pellicule « glacée » et cohérente, très finement craquelée quelquefois, ou au contraire en « moquette », peu cohérente, pulvérulente

(1) Nous entendons le terme *argilites* comme « roches argileuses peu stratifiées et indurées par compaction », *le terme argiles* comme « roches argileuses meubles » (Foucault et Raoult, 1980, *28*).

et présentant un aspect velouté... Dans le premier cas, les réflectances sont élevées dans tous les canaux jusqu'à approcher les réflectances des sables non dénudés ; dans le second, les réflectances sont plus basses, faibles surtout dans le canal 5. Entre les deux, on rencontre une vaste gamme de faciès intermédiaires, selon que les craquelures deviennent des fentes abaissant la réflectance ou selon la couleur des argiles.

Ajoutons que les aires à kaolinites présentent rarement des surfaces absolument homogènes : épandages de cailloutis fluviatiles où dominent les quartz clairs sur quelques mètres carrés ici et là, arrangements de graviers et de sables en festons engendrés par l'impact des gouttes de pluie et le vent pendant les averses... Ces interventions modifient certainement la réflectance, sans que nous sachions exactement dans quelle mesure.

Enfin, dans les facteurs de variation de l'état de surface des aires kaoliniques, il faut faire la place du piétinement par le bétail. Le bassin de l'Eghazer wan Agadez est abondamment parcouru, à la fin de la saison des pluies, par des dizaines de milliers de têtes de bétail venues consommer les pâturages éphémères mais abondants, de plantes annuelles et les eaux salées des sources. La circulation du bétail n'est pas organisée en axes de parcours linéaires (1), elle est donc impossible à repérer systématiquement plusieurs années après l'enregistrement. Néanmoins, les traces de passage sont très visibles dans le paysage : les pieds des bêtes se sont profondément enfoncés dans les argiles encore humides ou bien ils ont rendu pulvérulentes des surfaces lisses : le piétinement se traduit sur les images Landsat par une absorption plus élevée.

Ailleurs dans les pays de l'Azawagh, entre In Abangharit et le confluent avec le fleuve Niger, les argiles proprement dites ne sont représentées que sur des surfaces moindres qui correspondent pour la plupart à des accumulations dans les bas-fonds : dépressions au pied des cuestas et dépressions inter-dunaires. Il existe certes des formations lithologiques argileuses, argilo-gréseuses, argilo-calcaires mais sur des surfaces d'extension limitée car elles sont recouvertes par les masses sableuses du centre de l'Azawagh ou par une végétation jointive dans le sud. Ce n'est qu'au nord des 15e et 16e parallèles que l'on peut rencontrer des argiles nues dans les bas-fonds ; ailleurs elles sont recouvertes, partiellement quand l'inondation est abondante, en totalité quand elle est modérée, d'une végétation arborée et arbustive à couronnes jointives.

1.2.3. Les formations des dépressions argileuses au pied des cuestas

La plupart des formations argileuses disposées au fond des anciens lacs ne sont guère reconnaissables directement ni identifiables comme telles sur image Landsat : les formes sont indifférenciées, les réflectances non discriminantes.

Ces dépressions sont placées de façon tout à fait classique au pied du glacis des cuestas cénomano-turonienne (région de Tasara) et paléocène (régions de Sessao-Mentes et de Tillia), à la limite des ensablements.

Les argiles qui les tapissent se différencient des montmorillonites de l'Eghazer : elles ont une réflectance plus élevée dans le canal 7. Dans certains cas, elles sont cependant difficiles à distinguer d'unités voisines (reliefs et glacis de la région de Tillia par exemple) car les réflectances de ces unités (regs, roches, formations hétérogènes) sont très voisines.

Les dépressions argileuses de la région de Tasara sont bien distinctes sur image Landsat (vue du 8 mai 1975, scène 206-048) : très absorbantes dans tous les canaux, elles sont très proches sur le plan radiométrique des dépressions interdunaires de la même région.

La cuesta paléocène et les buttes de la région de Sessao et de Mentès sont soulignées par des formations calcareuses et marneuses qui contiennent des éléments salins. L'ensemble présente des réflectances très élevées, à peine plus marquées dans les canaux 5 et 7 ce qui donne à la formation une teinte violet clair inhabituelle (scène 206-048, vue du 8 mai 1973) que l'on retrouve dans les bas-fonds interdunaires du

(1) A l'exception de la piste caravanière d'Agadez à Marandet (voir le chapitre *La présence humaine).*

voisinage (1). Toute la région est fréquentée à la fin de la saison des pluies par les troupeaux qui nomadisent ordinairement autour de Menaka au Mali, d'In Ates et d'Ayorou au Niger, venant faire ici la cure salée.

Les plus caractéristiques sont les gypses de la région de Tillia qui sont particulièrement visibles sur la vue Landsat de saison des pluies (scène 206-049, 30 septembre 1978). Ils se présentent sur la composition colorée sous forme de taches très claires, presque blanches, bien contrastées avec le voisinage, apparemment en position de bas-fonds. Mais leur réflectance et la proximité d'unités très absorbantes, les plateaux cuirassés, peut les faire confondre avec des nuages et leur ombre.

1.2.4. Les argiles des dépressions interdunaires

D'après les photographies aériennes, les argiles des dépressions interdunaires semblent être assez souvent des argiles sombres, fortement contrastantes avec les sables environnants par des limites nettes. Sur les images Landsat, ces limites sont floues en raison de la médiocrité de la définition et peut être aussi parce que le contact entre bas-fond argileux et pente dunaire est lui-même un ensemble souvent complexe dans lequel interviennent les différences de végétation et de faciès d'érosion, sur la pente, en bas de pente et au niveau de la rupture de pente.

Sur image Landsat, les dépressions interdunaires ne peuvent guère être identifiées par leurs formes : elles sont rarement étendues (les plus vastes, à l'est de Tazerzaït, mesurent moins de 6 kilomètres de longueur avec des limites très contournées) et la composition colorée photographique Landsat, les restitue de façon très simplifiée, amalgamée quand elles sont proches les unes des autres, très différemment en tous cas de ce qu'on peut en repérer sur les cartes à 1/200 000 et sur les photographies aériennes à 1/70 000. Les formes et les structures engendrées par la juxtaposition des dunes et des bas-fonds argileux sont par contre très visibles sur images numériques Landsat surtout après traitements par filtrages (ci-après page 168).

Autres argiles de bas-fonds : le lit récemment fonctionnel de l'Azawagh à la hauteur du massif d'Agalamlam : ici, nous sommes suffisamment au sud (le massif est traversé par le 16e parallèle) pour que la vallée présente des traces de dépôts argileux non recouverts par les sables et suffisamment au nord pour que la végétation n'occupe pas ces bas-fonds en totalité : les réflectances sont basses dans tous les canaux, notamment dans les canaux 5 et 7.

Les argiles autres que les montmorillonites ne présentent donc pas des réflectances, des formes ni des textures caractéristiques. Les réflectances sont souvent plutôt moyennes que basses, par rapport à un environnement souvent nettement réfléchissant (les sables), plus faibles dans le canal 5, éventuellement dans le canal 7. Les formes des unités géographiques sont variables et indifférenciées ; les textures sont inexistantes même si des arrangements d'intensité variable apparaissent ici et là. Leur identification est donc d'autant plus difficile qu'elles se trouvent souvent plus ou moins recouvertes ou encadrées par une végétation contrastant avec l'environnement et que des formations hétérogènes, caillouteuses et rocheuses, présentent, sur les mêmes espaces géographiques, des caractéristiques radiométriques très voisines.

1.3. LES FORMATIONS RUGUEUSES

Nous appelons « formations rugueuses » les surfaces hétérogènes formées de blocs durs plus ou moins gros et les surfaces rocheuses.

Les formations rugueuses présentent des caractères qui les différencient des formations lisses : elles sont peu mobilisables par le vent et par l'eau car la dureté des blocs juxtaposés protège les formations sous-

(1) Voir ci-après l'exemple de Tajinjer, p. 144.

jacentes si celles-ci sont meubles : les formations rugueuses sont donc souvent situées en relief par rapport aux sables et aux argiles, en « plateaux » plans à corniches et en crêtes disséquées par une érosion linéaire autrefois plus active qu'aujourd'hui. Elles constituent l'essentiel des surfaces en zone rocheuse et montagneuse (les roches nues et les éboulis) et recouvrent des terrasses fluviales plus ou moins remaniées dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez ou des cuirasses anciennes mises à nu. Les blocs présentent souvent sur les surfaces exposées à l'air un vernis brun rouge mat ou noir brillant. Les surfaces rugueuses sont le plus souvent dépouvues de végétation.

Dans le détail, elles sont toujours hétérogènes : blocs de taille différente, présence de sable dans les interstices et sous le vent des blocs les plus gros, diaclases des roches nues, pavages irréguliers de blocs sur sol argileux ou argilo-sableux, couleur différente des blocs par la présence de vernis plus ou moins sombres, de quartz clairs...

Les surfaces rugueuses n'ont été étudiées aux fins d'identification sur les données Landsat et Spot que dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez, où elles pouvaient être identifiées comme telles sur le terrain ; aucune source ne nous les indique par ailleurs : les cartes topographiques n'en font pas mention sauf sous le terme, bien vague, de « rochers » et les photographies aériennes, surtout les plus anciennes, de médiocre définition ne permettent pas non plus de les reconnaître de façon précise sinon indirectement par la présence du relief. Les références aux régions non visitées (le massif d'Agalamlam, la crête de Tin Drarin) manqueront donc de précision.

La présence fréquente d'altérations superficielles très sombres permet de classer la plupart des formations rugueuses dans les unités à réflectance basse et très basse, notamment dans le canal 7. Ces vernis en sont évidemment la cause, mais aussi probablement des effets d'ombre dans les regs à blocs décimétriques et les éboulis à blocs métriques. La réflectance des unités varie :

- selon la taille, la couleur et la densité des blocs,
- selon la couleur du matériau sous-jacent,
- selon les thèmes secondaires introduits dans l'unité *reg* ou *éboulis* et ses bordures par le relief.

1.3.1. Les regs à blocs vernis et les éboulis dans l'Eghazer wan Agadez

Les blocs vernis se rencontrent sur les parties non ensablées du plateau de Tegama (bordures de la falaise de Tigidit, massifs situés à l'ouest d'In Gall), sur les buttes témoin de la même formation (Anyokan, Azuza) et sur certains plateaux intermédiaires où les blocs seraient les restes d'une cuirasse ferralitique ou d'une carapace.

La réflectance est très basse dans le canal 7, plus élevée dans les canaux 4 et 5 ce qui rend ces formations pratiquement impossibles à confondre avec d'autres dans la même région. Les bordures sont particulièrement sombres en raison de la taille des blocs d'éboulis d'ordre métrique dans la falaise de Tigidit, des effets d'ombre et du fait que certains blocs d'éboulis sont eux-mêmes vernis.

Une autre caractéristique de ces unités est leur absence de compacité : elles sont découpées, pénétrées par des unités beaucoup plus brillantes où interviennent largement les réflectances des canaux 4 et 5 : c'est que les « massifs » sont parcourus par un chevelu dense et hiérarchisé de vallées étroites mais nombreuses occupées par des sables (à réflectance élevée, très contrastante dans tous les canaux) sables plus ou moins couverts par une végétation herbacée très brillante. Entre le massif sombre et la plaine, il existe donc toute une série de valeurs radiométriques intermédiaires selon la taille et l'abondance des vallées. Comme la pente est toujours forte sur les éboulis et dans les massifs, le gradient ne concerne que de très courtes distances et le contraste reste élevé entre les hauteurs, très sombres et le glacis, toujours très clair.

Dans la plaine de l'Eghazer, on remarque en aval de la falaise de Tigidit, la réflectance caractéristique de son glacis « ancien », élevée dans les canaux 4 et 5, moins accentuée dans le canal 7, ce qui donne, sur les compositions colorées photographiques standard, une teinte bleuâtre reconnaissable. Il s'agit de formations mixtes, cailloutis patinés en nappes denses sur matrice argilo-sableuse. Le glacis ancien de la

falaise de Tigidit s'étend sur plusieurs dizaines de kilomètres dans la plaine de l'Eghazer ; il est bien identifiable en raison de cette radiométrie particulière et de l'éventail convergent des axes d'écoulement plus clairs qui le traversent.

Au nord du glacis, dans la partie occidentale du bassin de l'Eghazer, s'étendent plusieurs plateaux caillouteux figurés sur images Landsat par des faciès radiométriques semblables au glacis précité, mais plus sombre. Les contours sont quelquefois nets, quelquefois flous (plateaux d'Akenzigi, d'Agasanar, d'Anyokan...). Ce sont des étendues planes limitées par des corniches nettes ou des éboulis courts, couvertes de dalles très anguleuses aux bords tranchants, très foncées ; ces plateaux correspondent-ils à une surface structurale dégagée dans les argilites sur lesquelles s'est déposé un vernis ferralitique ? ou, comme nous le pensons plutôt, à un horizon pédologique ancien, à une carapace ?

Ailleurs dans le bassin, on rencontre des regs à blocs vernis, de taille réduite, disposés en mosaïque sur des formations meubles. Ils constituent des plateaux étroits, des bourrelets plutôt, à corniches réduites ou des collines très entaillées par l'érosion linéaire. Dans certains cas, au nord de Tabzagor par exemple, les sommets ne sont pas patinés, ce sont les blocs des pentes qui le sont. Dans ces unités très disséquées, les pentes occupent beaucoup de place et c'est leur réflectance qui est clairement distincte, basse surtout dans le canal 7 comme tous les regs vernis ; la transition avec les unités voisines (terrasses non vernies, argiles...) est floue.

Enfin, parmi les blocs et éboulis vernis citons les petits massifs de grès d'Afara, de Tegidda n Adrar et de Tageyt, qui n'appartiennent pas à la formation des *grès du Tegama* mais à celle des *grès d'Agadez*. Ils présentent des surfaces moins sombres que les *grès du Tegama* car moins intensément vernies. Coupés de diaclases et de vallées peu distinctes dans le détail, les sables qu'ils contiennent éclaircissent l'ensemble.

1.3.2. Les « terrasses » de l'Eghazer et les argilites

C'est à dessein que nous mettons le mot terrasses entre guillemets ; nous devrions lui ajouter un point d'interrogation car nous n'avons pas la preuve que *toutes* les formations que nous désignons sous ce nom soient effectivement des constructions fluviales : le bassin de l'Eghazer tout entier est constitué de matériaux détritiques à l'évidence plusieurs fois remaniés au cours de phases de vigoureuse érosion depuis le début du Quaternaire. Il est donc bien difficile de faire sans une étude géomorphologique la part des formations récentes en place et des formations anciennes plus ou moins remaniées. Pour compliquer encore les choses, notons que certaines de ces « terrasses » (dans la région de Tegidda n Adrar, dans le « goulet » d'Adar Aghalen), sont vernies dans leur partie la plus élevée. Nous n'y reviendrons pas et n'aborderons ci-dessous que les formations rugueuses *non vernies*.

« Terrasses » non vernies et argilites se présentent sous la forme de petits reliefs de quelques mètres au dessus de la plaine environnante, avec un raccord généralement progressif en matériau meuble à dominante argileuse de type kaolinite.

Sur les images Landsat ces formations ont une réflectance moyenne dans les canaux 4 et 5 et se distinguent parfaitement des regs vernis. Elles se distinguent beaucoup moins bien des argiles dont elles sont très proches par la teinte générale et par la variété des nuances et des arrangements. Néanmoins, les caractères particuliers des pentes qui les encadrent introduisent un thème associé, celui de la végétation *tazmey*. Mais *tazmey* (1) n'est pas toujours présent ou visible sur les images Landsat, soit que la pente et la granulométrie locale ne lui soient pas favorables, soit que les conditions pluviométriques de la saison précédant l'enregistrement n'aient pas permis sa croissance. Il devient alors difficile de faire une différence péremptoire entre regs non vernis et argiles sur les données photographiques standard.

Au nord-est du bassin, dans la région de Tawarde située au sud des puits de Sekiret, on observe un faciès sombre de cette formation : il correspond à des reliefs plus élevés, à des unités plus compactes, moins

(1) *Tazmey* est le nom donné en tamasheq à diverses graminées annuelles de la famille des *Aristida* : *Aristida hordeacea*, *A. mutabilis*, *A. funiculata*, etc.

disséquées par l'érosion, aux pentes convexes peu habituelles sous un climat à tendance aride : les talwegs ensablés ou occupés par *tazmey* y sont peu nombreux et toujours très étroits ce qui explique en partie le faciès radiométrique. Il est possible cependant qu'il s'agit là d'une formation génétiquement différente.

1.3.3. Les formations de surface rugueuses dans l'Azawagh et les dallols

Dans les régions de l'Azawagh qui se trouvent en aval de l'Eghazer wan Agadez, une partie des surfaces rocheuses est aisément identifiable grâce aux réflectances très basses dans tous les canaux, qui correspondent à des surfaces vernies, et grâce aux linéaments hydrographiques très clairs sur le fond sombre, qui attestent la présence de reliefs. C'est le cas du massif d'Agalamlam et de la crête de Tin Drarin, par exemple.

Plus au sud, les plateaux du Continental terminal, cuirassés, parsemés de blocs très sombres, ferrugineux, sont couverts de végétation et c'est elle qui réfléchit la lumière et non pas les surfaces sous-jacentes. Mais l'ensemble constitué par la bordure supérieure des corniches et les éboulis de ces plateaux est très remarquable sur les images Landsat car il cerne de noir, avec une très forte absorption dans tous les canaux, les plateaux en question : ce cerne noir est la caractéristique des plateaux cuirassés en milieu sahélien et sahélo-soudanien.

En l'absence d'observations systématiques dans les pays de l'Azawagh proprement dit, il n'a pas été possible de relever sur les données Landsat la présence certaine de regs non vernis : leur réflectance, voisine de celle des sables couverts ou de formations argilo-sableuses environnantes, ne permet pas de les isoler. Les surfaces sommitales des plateaux cénomano-turoniens de la région d'In Teduq (au nord de Tasara), constituées de blocs décimétriques blanc et noir sur argiles claires ne se distinguent pas, sur image Landsat photographique en composition colorée, des glacis argileux et graveleux environnants. Ces lambeaux de plateaux ne sont identifiés que grâce à leur pourtour, souligné par les effets d'ombre des corniches et les éboulis.

Il convient de faire une mention spéciale pour les *glacis,* accumulations de bas de pente des plateaux et des cuestas creusées par l'érosion linéaire subactuelle et actuelle. Ils sont constitués de matériaux hétérométriques mais ne se comportent pas comme des surfaces dures. Ce n'est pas une réflectance caractéristique qui permet de les identifier (sauf, nous l'avons vu, le glacis « ancien » de la falaise de Tigidit qui constitue peut-être une exception) mais plutôt la disposition des axes d'écoulement qui les parcourent à condition que ceux-ci soient assez larges ou soulignés de végétation pour être visibles sur image Landsat.

Les exemples détaillés qui suivent vont préciser certains aspects des réflectances et des rapports avec le paysage des unités de formations de surface restituées sur images Landsat.

1.4. EXEMPLES DETAILLES

Pour illustrer le type de rapport entre les formations de surface telles qu'elles apparaissent dans le paysage et leur aspect sur image Landsat, nous avons choisi trois séries d'exemples :

— l'ensemble géographique d'Azelik, qui passe des sables aux montmorillonites par l'intermédiaire de divers regs et argiles ;

— les roches vernies et les éboulis de la *formation du Tegama* dans la région d'Izadelagan et sur la butte-témoin d'Anyokan ;

— plusieurs types d'organisation dunaire dans l'Azawagh.

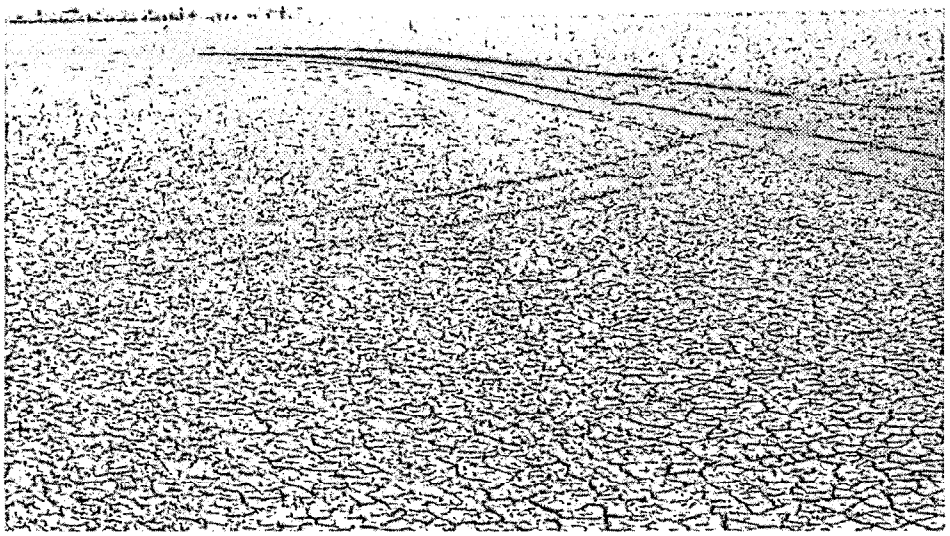


Figure 29 - Argiles sombres et craquelées des rives du kori *Tiegubay* (région d'Azelik). L'axe d'écoulement est visible par les lignes de décrue parallèles sur rive convexe dont les petites dénivellation font ombre. Il ne se différencie pas par la nature des argiles et est absolument invisible sur les images Landsat.

Figure 30 - Montmorillonites très sombres de la vallée de l'Eghazer wan Agadez, au nord-est d'Azelik : bombements, fentes de retrait géantes et pulvérulence de surface contribuent à donner à cette formation des réflectances très basses dans tous les canaux.

1.4.1. La région d'Azelik (feuille Teguidda in Tessoum) (1), d'après les données numériques, vue du 12 janvier 1976, scène 204-048 (cf. Annexe 6, figures 69, 70,75)

Le secteur qui a été plus particulièrement étudié sur données Landsat, sur photographies aériennes et sur le terrain, mesure environ 10 kilomètres sur 10 et est centré sur le site archéologique et les sources d'Azelik.

L'ensemble est situé à l'extrémité nord-est de l'anticlinal faillé d'Azelik où les *grès d'Agadez* percent les *argilites de l'Eghazer* sus-jacentes. Une « dune » encadrée de bancs de grès dur se trouve ainsi en contact avec les formations argileuses kaoliniques. Au nord d'Azelik se trouve la vallée de l'Eghazer wan Agadez, qui dessine là un coude prononcé. De la dune d'Azelik, en léger relief dans le paysage (une vingtaine de mètres de dénivellation), s'échappent plusieurs petits kori sableux qui se dirigent dans toutes les directions ; le principal d'entre eux est le Tiegubay, alimenté par un bassin plus vaste que les autres et par les sources permanentes d'Azelik. En réalité, les kori ne coulent qu'à l'occasion des pluies purement locales et l'eau des sources, abondamment prélevée pour l'abreuvement des troupeaux, ne s'écoule pas sur plus d'une cinquantaine de mètres en aval.

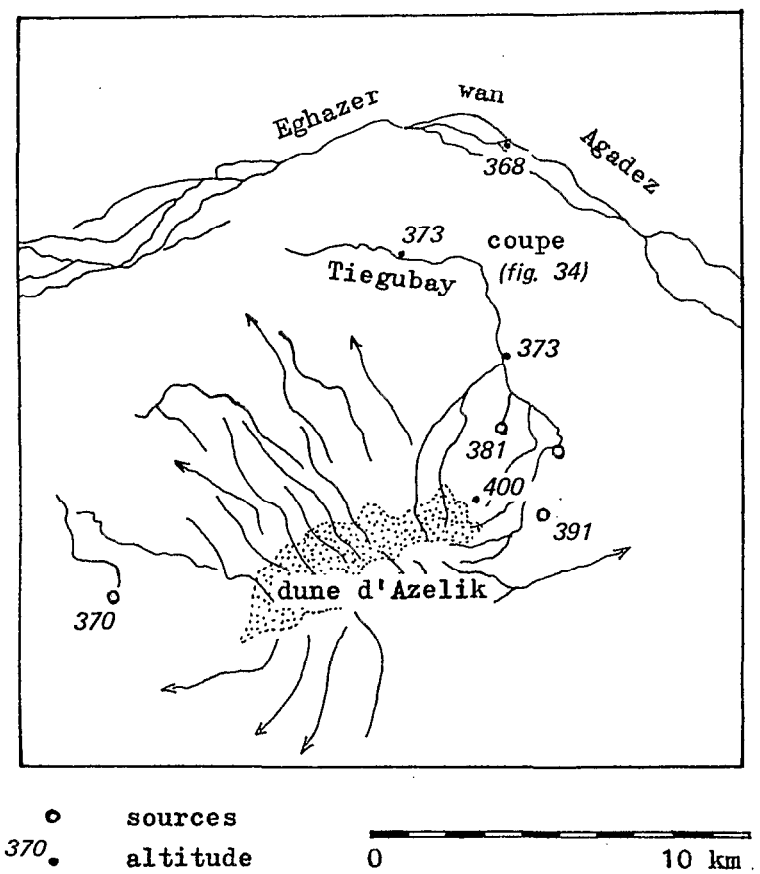


Figure 31 — Le secteur d'Azelik, croquis géographique

(1) L'identification *feuille* ... identifie la coupure au 1/200 000 des cartes topographiques sur laquelle se trouve le secteur décrit (orthographe IGN).

Le rapport entre les grandes unités géographiques du secteur, relevées sur la composition colorée Landsat, les photographies aériennes et l'observation du terrain et les niveaux radiométriques de l'image numérique, donne le schéma suivant qui figure chacun des quatre canaux :

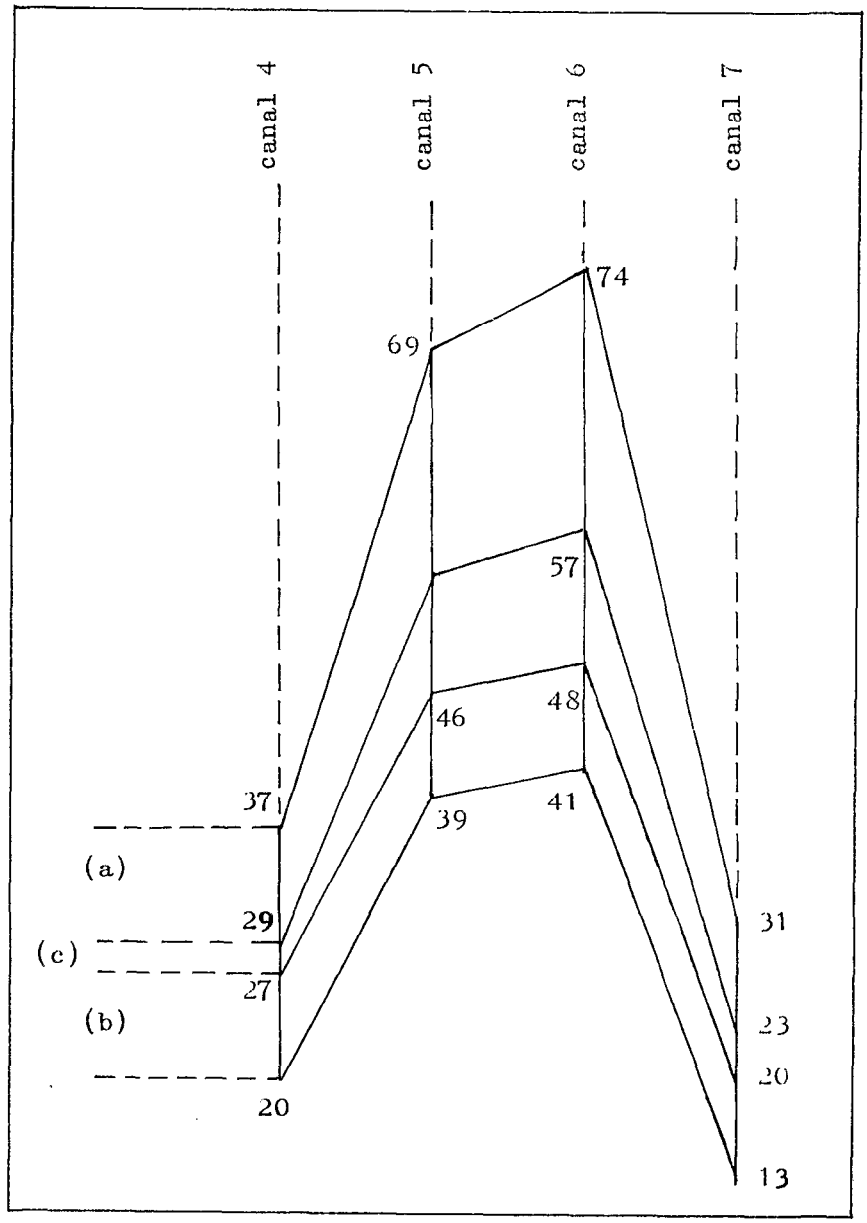


Figure 32 - Le secteur d'Azelik, niveaux radiométriques

a) Les aires les plus réfléchissantes correspondent soit à des sables plus ou moins couverts de végétation (nous y reviendrons dans le chapitre *végétation*), soit à des argiles claires, peu craquelées, luisantes.

Les premiers se trouvent principalement sur l'aire des sables d'Azelik (la dune) et dans la zone de recouvrement sableux de la rive droite de l'Eghazer wan Agadez ; les secondes sur la rive gauche de l'Eghazer wan Agadez, entre Azelik et le lit mineur.

Ces unités géographiques, délimitées par les niveaux radiométriques indiqués sur le schéma de la figure 32 sont parsemées de pixels de réflectance plus élevée. Sur les sables d'Azelik, ces pixels, nombreux et dispersés, semblent figurer des aires dénudées ; sur l'aire argileuse de la rive gauche, les très fortes réflectances correspondent à une prairie *tazmey.*

b) Les aires les plus absorbantes ont une disposition linéaire qui suggère une origine fluviatile. C'est en partie le cas : la vallée de l'Eghazer est marquée par un lit d'argiles sombres et très sombres, illites et montmorillonites pulvérulentes à larges fentes de retrait ; mais les aires absorbantes qui se trouvent immédiatement au sud de la dune d'Azelik sont des regs vernis.

c) Les réflectances moyennes « remplissent les vides » en quelque sorte : elles ne semblent pas correspondre à des unités géographiques nettement délimitées mais à des formations argileuses, caillouteuses ou hétérogènes de nature diverse : tout autour de la formation d'Azelik ce sont des cailloutis moyens, non vernis, hétérogènes, épars sur lit argilo-sableux ; dans la même tache élémentaire peuvent se mêler ces cailloutis, des sables disposés linéairement (les kori issus de la dune), des plaques de cailloutis vernis. Il en est de même sur la formation d'Azelik elle-même où les plaques de cailloutis réduisent la réflectance des taches élémentaires dans lesquelles elles se trouvent.

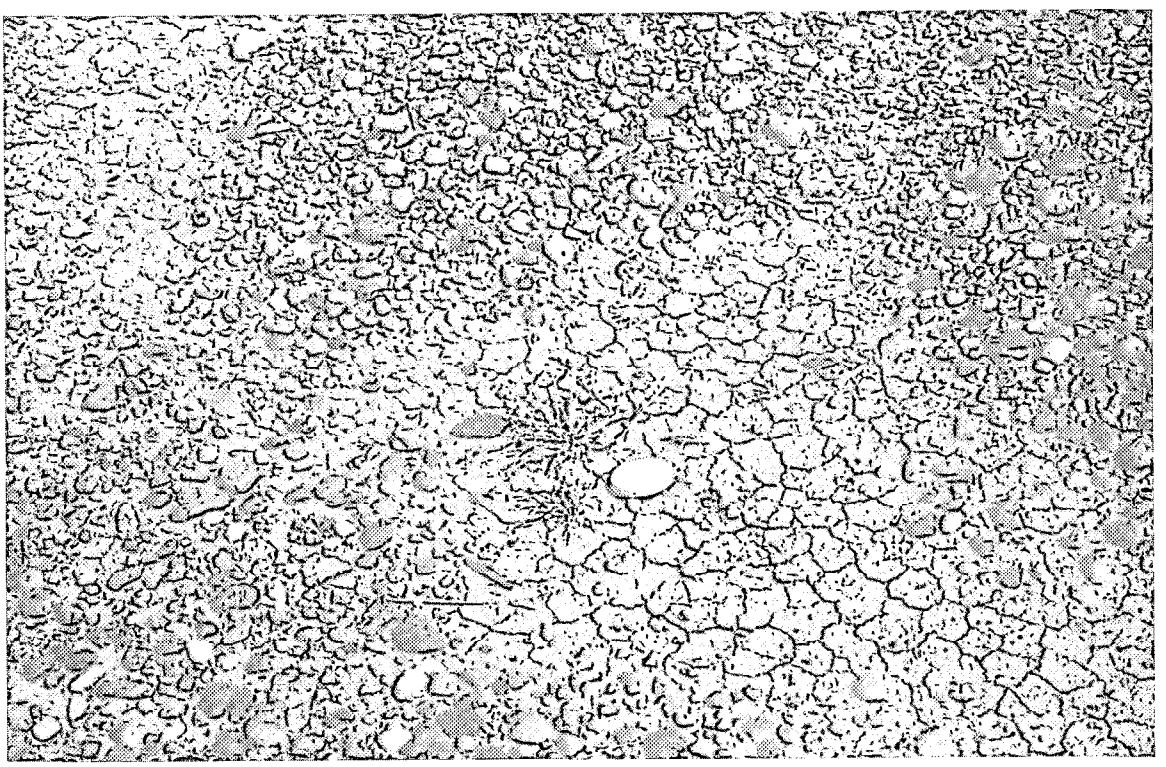


Figure 33 - L'hétérogénéité des formations de surface, région d'Azelik : des plaques d'argile ou de sable alternent avec des plaques de cailloutis fluviatiles de teintes variées (quartz blancs et blocs vernis noirs). Sables ou argiles favorisent la fixation de petites touffes d'herbacées annuelles (ici, une *Aristida*). Le couvercle au centre de la photographie donne l'échelle.

De part et d'autre du lit de l'Eghazer wan Agadez, les réflectances moyennes correspondent à des argiles intermédiaires entre les montmorillonites à larges fentes de retrait et les argiles très claires, lisses et luisantes : ce sont les argiles « moquette », pulvérulentes et quelquefois piétinées.

Au milieu des argiles lisses de la rive gauche, le kori Tiegubay se marque distinctement par une ligne de réflectances moyennes : le talweg proprement dit est tapissé d'argiles sombres à larges fentes de retrait et les abords sont piétinés.

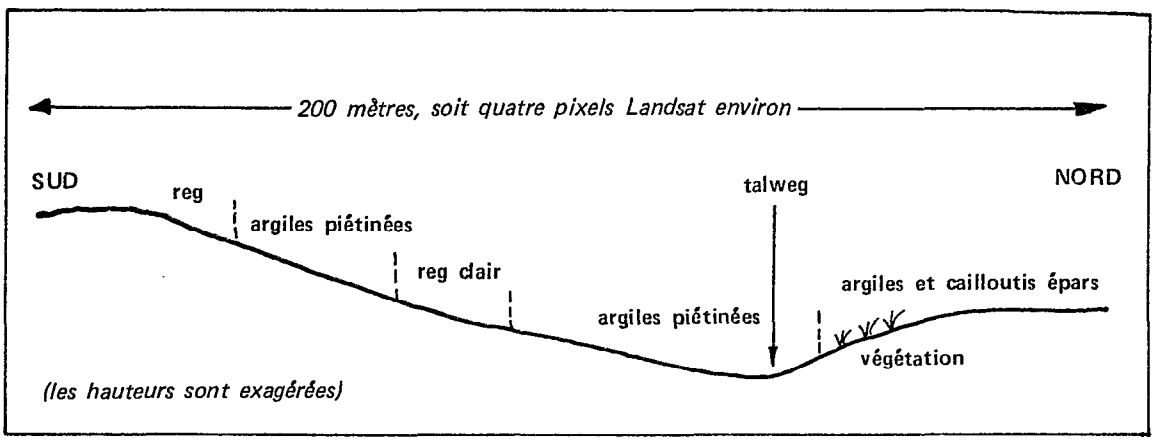


Figure 34 - Coupe dans le kori de Tiegubay

La différence entre les argiles et les regs moyens a été recherchée à plus grande échelle dans la zone appelée par nous *Amumun,* du nom de l'éleveur Touareg qui, ayant perdu son troupeau en 1973, a tenté de tirer parti de l'eau des sources pour irriguer quelques mètres carrés de jardin (Bernus 1975) et dont le jardin se trouvait au centre de la zone en question.

A l'échelle de la visualisation sur écran Péricolor (1/10 000 approximativement) le canal 4 est trop ligné pour être utilement exploitable. Nous ne l'avons pas lissé puisque notre propos est d'examiner les données sans les modifier : nous n'avons donc examiné que les canaux 5, 6 et 7.

Sur le canal 5, les argiles lisses et claires sont bien délimitées du niveau 62 au niveau 57. Dans le même niveau, on trouve les sables de la bordure de la dune d'Azelik, déjà mêlés d'argiles et/ou de plaques de cailloutis. Les deux formations sont parsemées inégalement de pixels de valeur radiométrique supérieure à 62 qui représentent comme on l'a vu précédemment, soit des aires de sables nus, soit de la végétation *tazmey*, bien visible dans le Tiegubay sur l'emplacement du jardin d'Amumun (délaissé au moment de la prise de vue et jamais remis en état).

En bordure du niveau 62-57, on trouve systématiquement le niveau 56-54 qui représente une transition due au relief entre le niveau ci-dessus et le suivant : des linéarités (les kori) du premier y pénètrent dans le suivant, affectant en hausse sa réflectance.

Le troisième niveau (53-51) est celui des cailloutis moyens et des argiles plutôt sombres qui s'interpénètrent les uns les autres. Des linéarités y apparaissent (au sud des « jardins ») qui sont peut-être les lignes de végétation qui bordent deux kori plus importants.

Le quatrième niveau (50-46) représente des argiles « moyennes » faiblement parsemées de plaques de cailloutis, et des argiles claires piétinées par le bétail.

Les cinquième et sixième niveaux (45-41) sont des cailloutis relativement denses, vernis, et des blocs rocheux vernis. Ils ont en réalité une extension spatiale plus grande que ce qui est suggéré ici par des taches élémentaires isolées mais les sables qu'ils retiennent par endroits peuvent affecter leur réflectance générale et les placer dans le niveau supérieur.

L'extension de ces cailloutis paraît plus satisfaisante sur la représentation de la zone dans le canal 6 où ils sont inférieurs au niveau 45 mais un lignage important masque les contours réels.

Dans le canal 6, la représentation des unités *sable* et *argiles claires* reste satisfaisante de même que celle de la végétation. Ici, les axes hydrographiques sont particulièrement visibles, notamment le Tiegubay, mais sous deux niveaux successivement : dans sa partie méridionale, il est marqué par des alluvions sableuses qui disparaissent au niveau du jardin d'Amumun et sont remplacées par des argiles sombres, piétinées de surcroît (coupe figure 34) (1).

C'est le canal 7 qui paraît donner les informations les plus précises sur les argiles et les cailloutis :

— argiles lisses et claires : niveaux supérieurs à 24 ;

— argiles moyennes un peu plus craquelées que les précédentes ou légèrement parsemées de cailloutis : niveaux 24 et 23 ;

— argiles bosselées et piétinées ou argiles « moquette » pulvérulentes : 22 et 21 ;

— cailloutis moyens dominants : 20 et 19 ;

— cailloutis patinés dominants et roches nues : niveaux inférieurs à 19 et même inférieurs à 17 pour les densités de cailloutis les plus élevées ;

— sables plus ou moins couverts de végétation : 25 et 24.

Ici, et dans les autres canaux, pas de différence nette entre les argiles claires et les sables, pas plus qu'entre les argiles un peu plus sombres et les bordures entre sables et cailloutis moyens.

Notons toutefois une anomalie : les réflectances extrêmement basses sur données Landsat des roches nues de la formation des *grès d'Agadez* du sud-est. Sur le terrain, ces roches ne sont ni patinées ni naturellement sombres : au contraire, le piétinement, le frottement par les animaux qui viennent s'abreuver aux sources que ces roches encadrent les auraient plutôt « éclaircies ». Faut-il voir là un effet occasionnel et local non observé plus tard ? mais de quelle origine ? Est-il vraisemblable que les formes de micro-érosion présentes sur ces roches (fissures, crêtes indurées, blocs détachés) aient engendré un effet d'ombre ? Pour le moment, aucune explication n'est satisfaisante.

1.4.2. Les formations rocheuses vernies dans les grès du Tegama, d'après les données numériques de la vue du 12 janvier 1976, scène 204-048 (feuille *In Gall*).

La formation gréseuse du Tegama, qui constitue le niveau dur du plateau de la Tadarast, se signale, partout où elle affleure, par des amoncellements de blocs rouge sombre ou noir brillant en surface, beige moyen là où la roche n'est pas vernie. On ne la rencontre qu'en position dominante ; elle constitue des reliefs accentués, limités par des escarpements nets.

---

(1) Il est remarquable (mais pas absolument étonnant) que le jardin d'Amumun, (re)créé en 1974 occupe une partie de l'emplacement des *jardins d'Azelik*, installation irriguée d'époque dite « médiévale » (antérieure au XVIe siècle) dont les traces (canaux et carrés) sont encore visibles sur photographies aériennes (S. Bernus et al. à paraître).

Figure 35 - Traçage de polynombre : thème *grès du Tegama affleurant et éboulis*, Colorplot d'après données numériques, scène Landsat 204-048, vue du 12/01/76, image partielle

L'essentiel des surfaces du plateau de la Tadarast est recouvert de sables mais au voisinage de la falaise de Tigidit, sur les buttes-témoins de la plaine et dans les massifs de la région d'In Gall, où la tectonique joue un rôle important, les grès affleurent, présentant des surfaces caillouteuses, diaclasées et fissurées, des éboulis et des amoncellements de blocs :

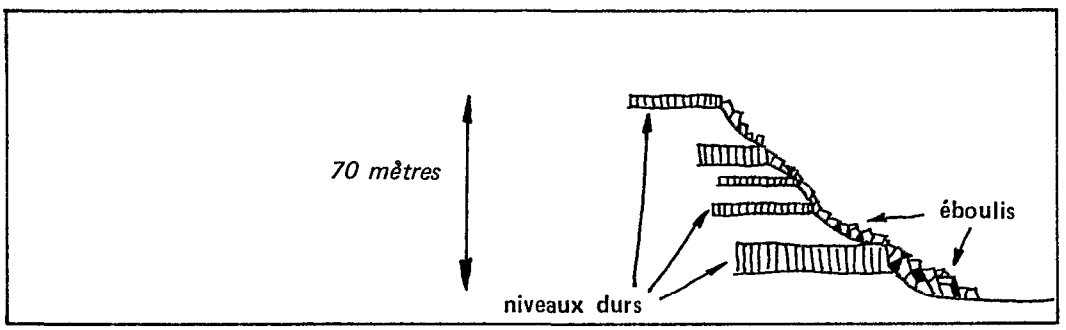


Figure 36 - La cuesta à Izadelagan, coupe

On ne sait pas pourquoi la bordure supérieure des escarpements est dépourvue de couverture sableuse : peut-être faut-il y voir l'effet d'une déflation provoquée par les remous au voisinage de la falaise...

Ces aires sont très visibles sur les images Landsat en raison des réflectances extrêmement basses qu'elles présentent, notamment dans le canal 7 ; ces basses réflectances soulignent nettement tout le tracé de la falaise de Tigidit.

Les grès patinés du Tegama sont bien définis par le polynombre suivant, qui représente les niveaux inférieur et supérieur dans chaque canal (1) : 19-24 ; 24-37 ; 29-38 ; 5-14.

La visualisation de ce polynombre (de tous les pixels qui, dans chaque canal, sont concernés par ces intervalles de valeurs radiométriques et eux seuls) ne fait pas apparaître des masses compactes mais des masses qui présentent des « vides », des pixels dont le polynombre est différent. Comme le polynombre des grès du Tegama est très bas (il correspond à une absorption très élevée dans tous les canaux), les taches élémentaires non prises en compte ne peuvent avoir qu'un polynombre à composantes plus élevées. Ces valeurs plus hautes peuvent être dues à la présence, sur des unités de surface inférieures à celle de la tache élémentaire, de sables piégés par la rugosité de la surface, partiellement recouverts de végétation.

Le relief de la formation introduit une autre notion parasite : la réflectance des vallées qui parcourent les massifs ou coupent la falaise. Dans la partie haute et compacte des grès, qui présente en majorité éboulis et pierrailles, les vallées sont très étroites, peu nombreuses, peu ou pas prises en compte par l'enregistrement Landsat. Au fur et à mesure que l'on s'approche du niveau de base, elles s'élargissent et finissent par apparaître au niveau de la tache élémentaire. Entre ces deux extrêmes, on a un phénomène de bordure qui traduit la mixité des thèmes : roches et éboulis vernis plus sables. Le polynombre « de bordure » (23-30 ; 34-50 ; 35-48 ; 12-20) définit *aussi* un thème différent : le glacis en reg verni en aval de la falaise.

(1) Polynombre valable uniquement pour la vue du 12/01/76, cela va sans dire.

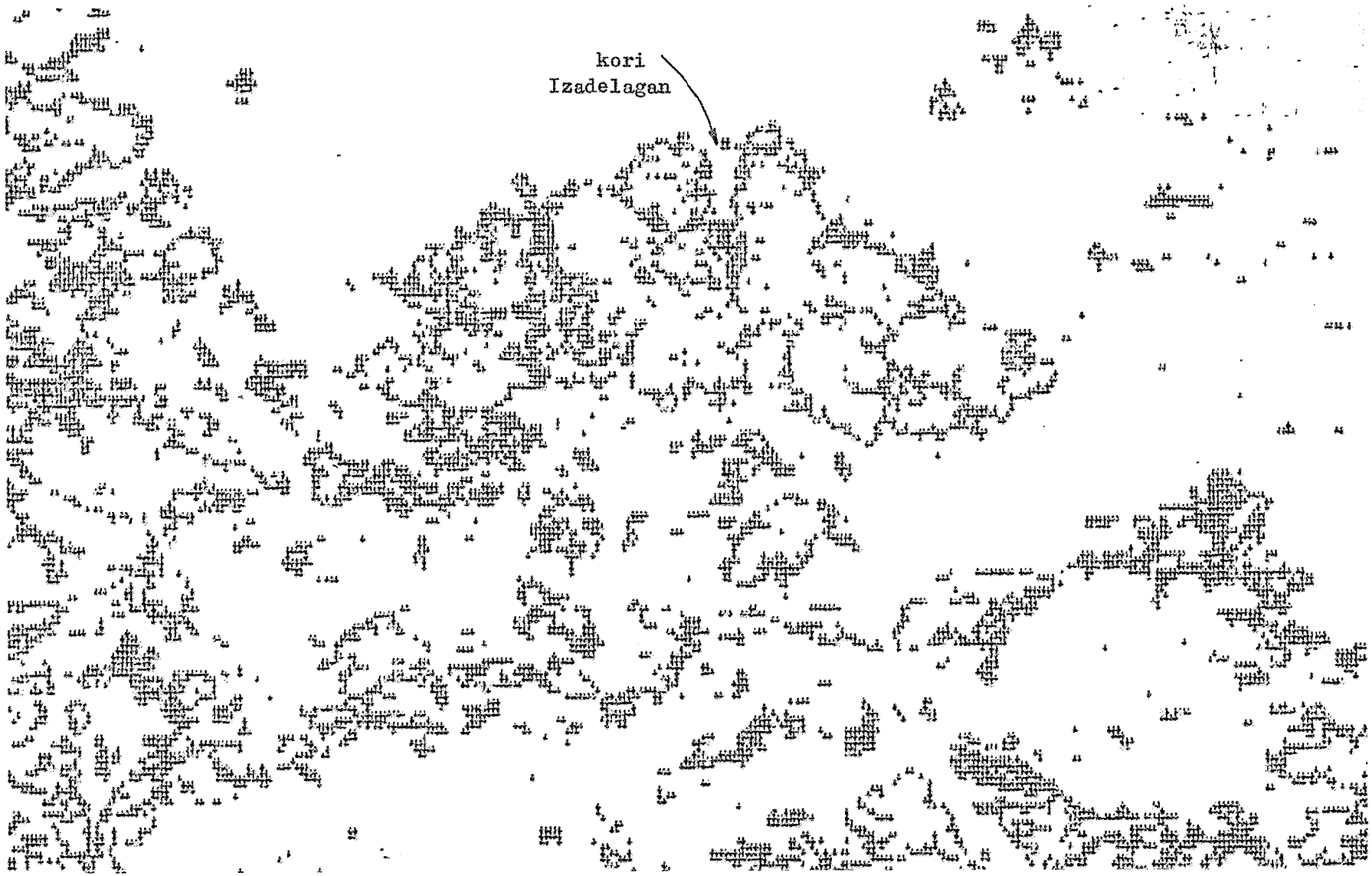


Figure 37 - Traçage de polynombre : thème de bordure, Colorplot d'après données numériques, scène Landsat 204-048, vue du 12/01/76, image partielle

Sur le terrain, la mixité du paysage dans le massif d'Izadelagan est mise en évidence par la photo (figure 38) prise depuis l'un des points culminants (cote 581 m) :

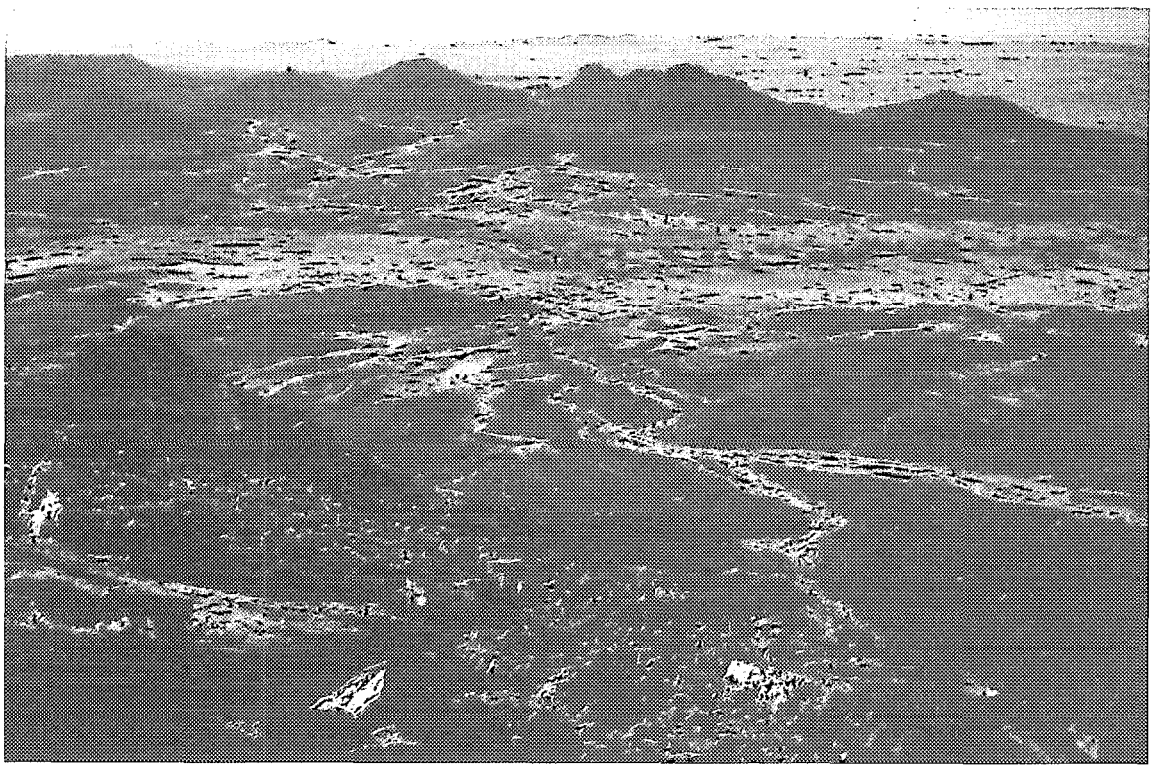


Figure 38 - Izadelagan.

Au premier plan, les blocs vernis détachés de la corniche supérieure ; plus bas et à l'arrière plan, le réseau des vallées ensablées et occupées par la végétation *tazmey*. On voit distinctement la large vallée du kori Izadelagan occupée par des sables et des graviers et le cours actuellement fonctionnel quelques jours par an, creusé entre ses berges et jalonné d'arbres *(Acacia ehrenbergiana)*. Au fond, le glacis « ancien » de la falaise de Tigidit dans sa partie sableuse occupée par une végétation clairsemée. Les regs vernis du glacis ne sont pas visibles ici.

Le même thème *roches nues et éboulis vernis de la formation du Tegama* se trouve sur les parties hautes de la butte-témoin d'Anyokan. La butte d'Anyokan dresse, au nord d'In Gall, ses remparts subverticaux bordés d'éboulis. Elle domine la plaine de plus de 60 mètres par endroits.

Le polynombre cité plus haut (19-24 ; 24-37 ; 22-38 ; 5-14) cerne parfaitement la butte et met en évidence, comme dans la région d'Izadelagan, un *effet de bordure* dû au fait que certaines taches élémentaires ne sont pas concernées par *tous* les intervalles de polynombre mais par un, deux ou trois d'entre eux seulement sur les quatre. Cette bordure met en évidence l'axe synclinal occupé par des sables et de la végétation éparse dans l'étroite vallée et les parties les moins raides des éboulis qui l'encadrent.

Une « coupe radiométrique » à travers la butte est matérialisée par le graphique de la figure 39.

La coupe commence à quelque distance des parois de la butte, dans la plaine : les réflectances sont hautes dans tous les canaux, notamment dans les canaux 5 et 6 ; elles correspondent au glacis de la butte,

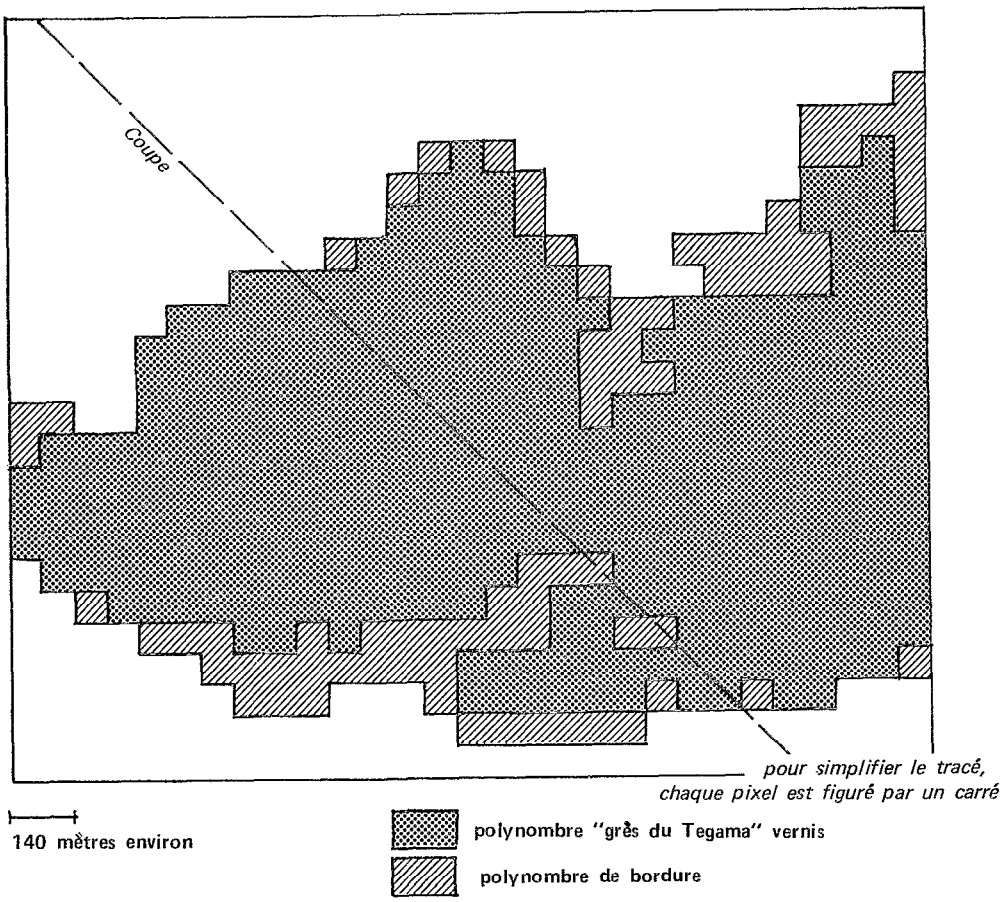


Figure 39 - La butte d'Anyokan, polynombres

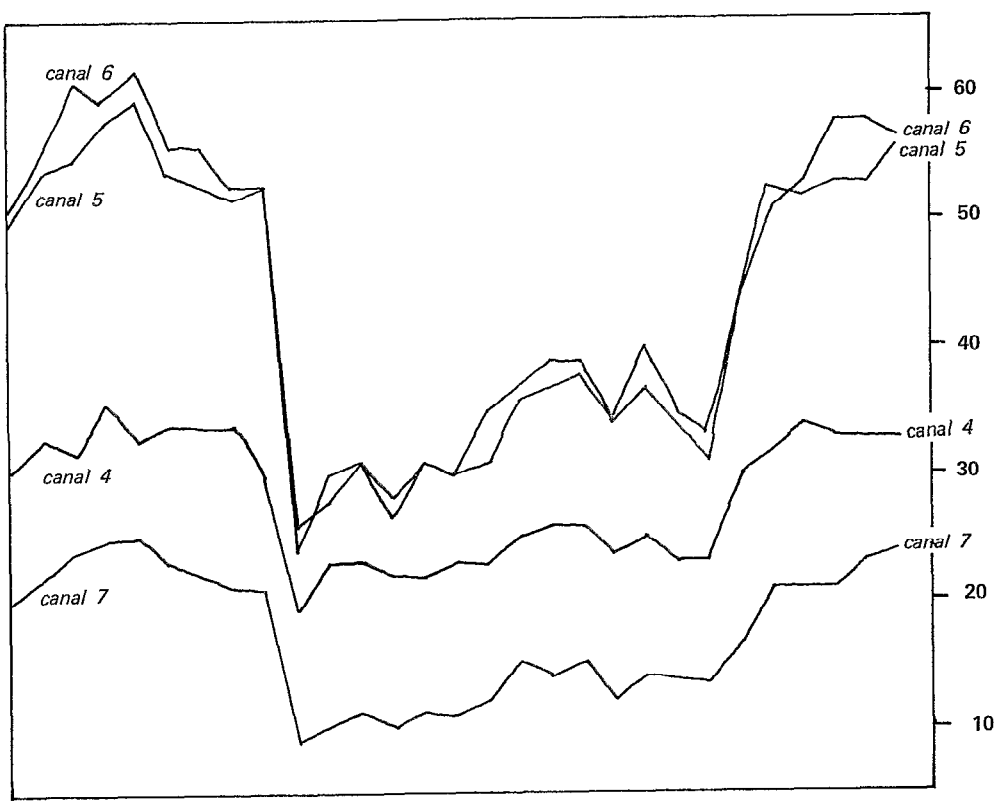


Figure 40 - La butte d'Anyokan, courbes des valeurs radiométriques

sables et végétation herbacée très discontinue sur des pentes de l'ordre de 1 à 5 %. On trouve le même glacis, avec les mêmes caractéristiques radiométriques, tout le long de la falaise de Tigidit.

Les réflectances « tombent » ensuite brutalement dans tous les canaux quand on atteint la butte elle-même avec une transition préalable qui peut représenter des éboulis récents puisque non vernis. Les pics au sein des très faibles réflectances de la butte proprement dite correspondent à des aires de faible extension dans lesquelles se trouvent piégés des sables . Le pied de la butte est nettement marqué au sud-est par une bande de végétation *tazmey* très brillante dans tous les canaux et surtout dans le canal 6.

1.4.3. Quelques organisations dunaires dans l'Azawagh, d'après les compositions colorées Landsat

a) *Le massif de Tin Drarin (versant ouest) (feuille Ouaritoufoulout)* d'après photographies aériennes AOF 55-56 NE 31-IV, 353 à 357 et d'après images Landsat scène 206-048, vues du 8 mai 1973 et du 26 mars 1976.

A l'ouest du massif de Tin Drarin s'étend un long glacis argilo-sableux suivi d'un bas-fond argileux puis d'un plateau (terrasse fluviale ?) peu élevé mais dont la dénivellation est nettement marquée, recouvert de sable en rides très fines (de l'ordre de la dizaine de mètre de longueur d'onde).

Sur l'ensemble, se surimposent de hautes dunes circulaires de un kilomètre de diamètre environ, isolées ou coalescentes.

Sur les photographies aériennes examinées au stéréoscope, elles se distinguent parfaitement du plateau à rides fines qui a à peu près la même brillance, du bas-fond argileux nettement sombre et du glacis de brillance moyenne. Il est à noter que ces hautes dunes sont beaucoup plus nombreuses dans le bas-fond que dans les autres secteurs.

Sur l'image Landsat, elles sont beaucoup moins distinctes : on ne les identifie pas sur le plateau ; dans le bas-fond argileux, elles ne sont réellement distinctes en tant que telles (forme, dimensions, contraste avec le voisinage) que dans la partie sud de l'ensemble de Tin Drarin.

Pour expliquer cette absence de netteté, on peut formuler plusieurs propositions :

— l'absence de contraste entre sables et argiles sur l'image Landsat, due à la qualité propre de l'enregistrement et à celle de la restitution photographique ;

— la présence de végétation sur les dunes, accentuant l'absorption lumineuse : les photographies aériennes montrent en effet une végétation herbacée radiante depuis le sommet et suivant vraisemblablement des axes d'écoulement linéaire du type « barranco » volcanique et un piquetage arboré ;

— la taille des bas-fonds interdunaires, insuffisante entre les dunes coalescentes pour les rendre visibles au niveau de la résolution Landsat restituée photographiquement.

Il est possible que les deux dernières explications se combinent dans la partie nord du massif.

b) *Agalamlam Est (feuille Ouaritoufoulout),* d'après images Landsat composition colorée du 19 février 1976 et composition colorée du 30 septembre 1978, scène 206-049 et photographies aériennes AOF 55-56 NE 31-IV, 175, 176 et 177 (cf. photo couleurs hors-texte, figure 71).

A l'est du massif d'Agalamlam, les sables présentent sur les données Landsat une texture régulière de type évidemment éolien, en rides sinusoïdales régulièrement ondulées espacées de 2 à 3 km. Ces rides sont rendues visibles par une gamme de réflectances relativement complexes, alternativement moyennes, basses et élevées dans tous les canaux.

L'examen des photographies aériennes fait apparaître cette complexité et en donne des éléments d'interprétation. Il existe ici deux ergs superposés : une série de dunes orientées, à profil dissymétrique dont la pente la plus raide tourne le dos à la source d'éclairement au moment de l'enregistrement, ce qui peut engendrer un effet d'ombre propre.

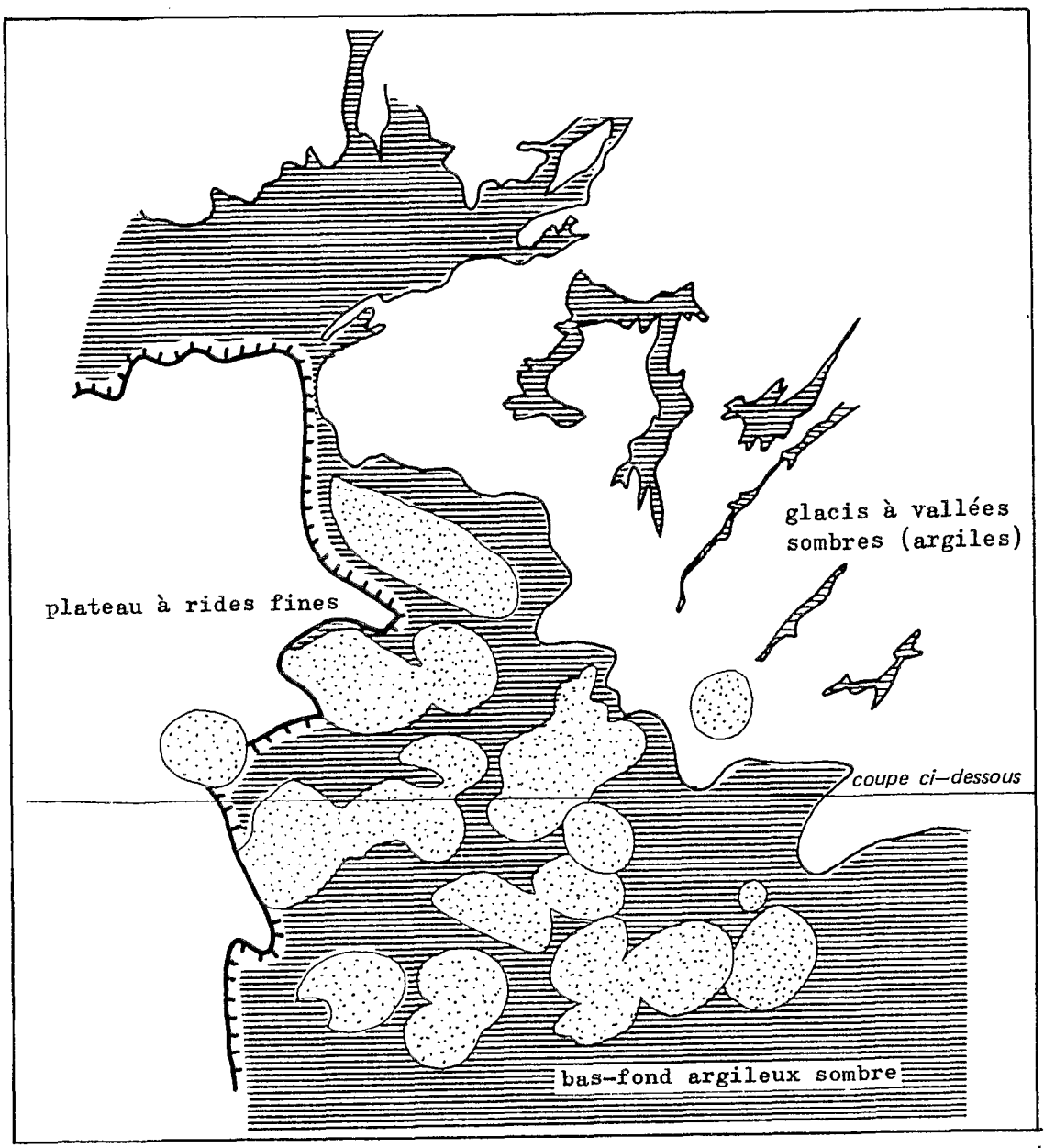
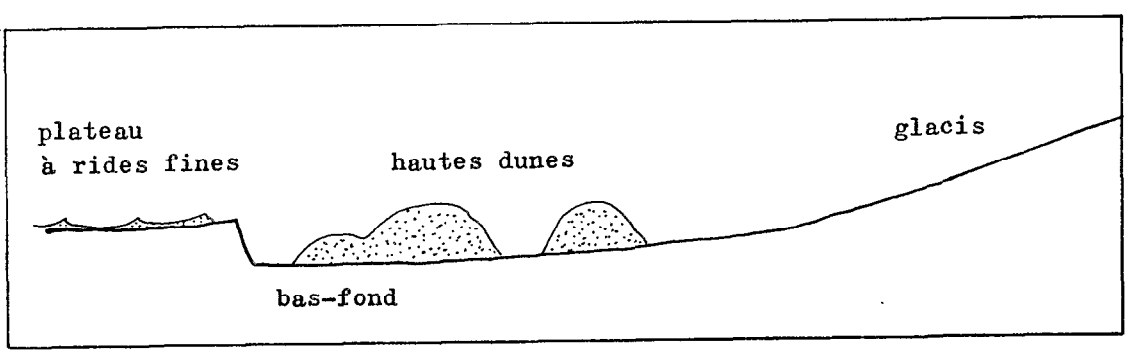


Figure 41 - Tin Drarin, croquis d'après photographies aériennes AOF 55-56 NE 31-III, 225



Ces dunes semblent surimposées à un ensemble constitué de dunes trapues alternant avec de vastes bas-fonds sombres de forme irrégulière et d'orientation générale identique. Ces sables sont couverts d'un piquetage végétal distinct sur les photographies aériennes : les bas-fonds sont dénudés en leur centre, mais bordés d'une végétation dense et très absorbante. L'ensemble offre bien une alternance nette de réflectances moyennes à tendance haute et de réflectances basses.

S'ajoutent à ces deux ergs, par endroits, des pointements rocheux sombres piégeant sur leur face orientale des sables très clairs, dépourvus de végétation, constituant des dunes vives isolées.

Sur Landsat les réflectances semblent bien correspondre au second erg décrit ci-dessus, le plus ancien. L'erg intermédiaire (les dunes dissymétriques) n'y semble pas visible peut-être parce que son orientation se confond absolument avec celle de l'erg précédent, plus probablement parce qu'il ne présente pas de contrastes de réflectance accentués entre les reliefs sableux et les bas-fonds.

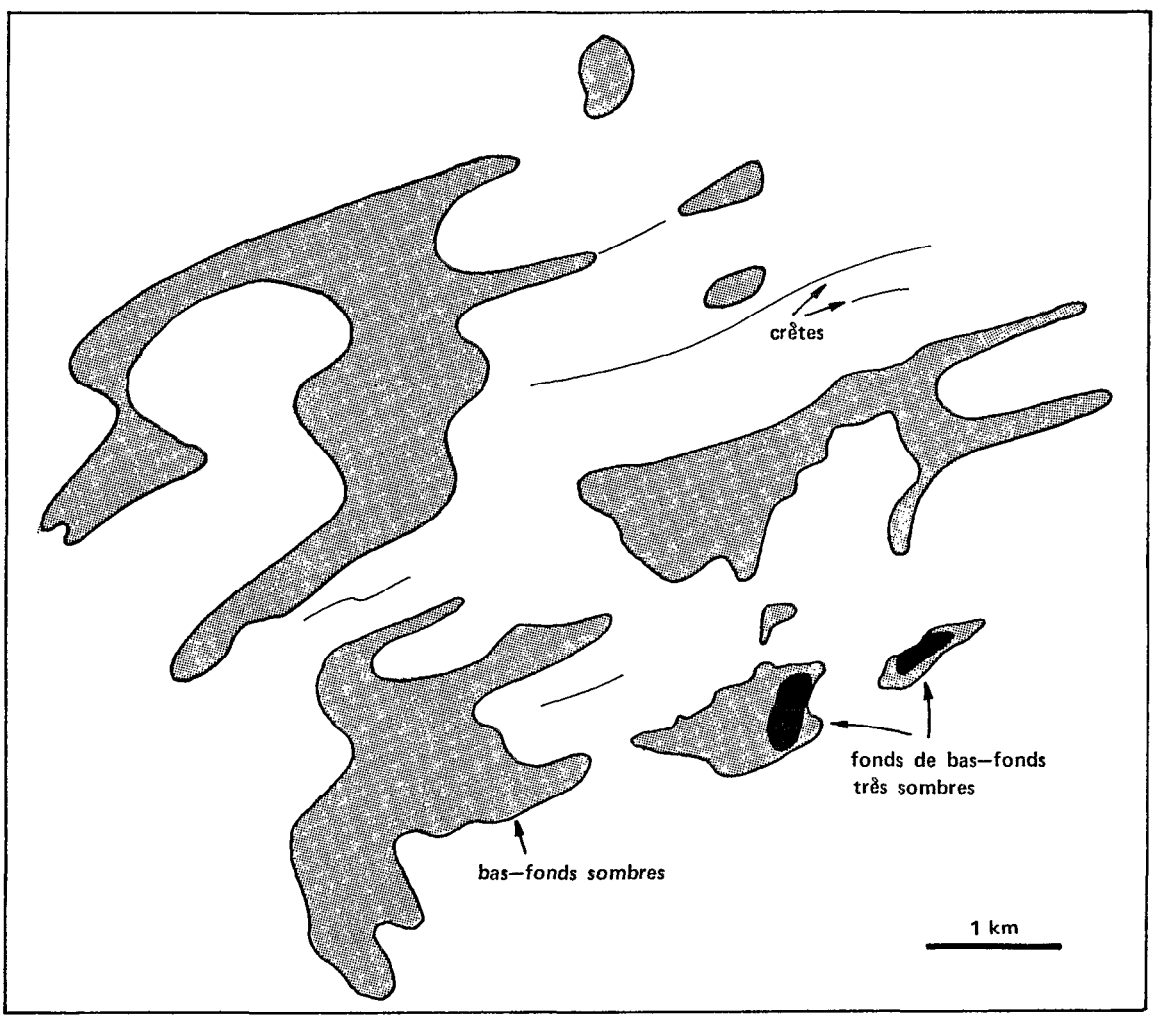


Figure 42 - Agalamlam est, croquis d'après photographies aériennes AOF 55-56 NE 31-IV, 176

Nous reviendrons à l'occasion du chapitre *Végétation* sur la juxtaposition des formes végétales dunaires et des formes végétales dans les bas-fonds et sur le problème de leur restitution sur les données Landsat.

c) *Le revers du plateau de Tajinjer (feuille Tillia),* d'après photographies aériennes AOF 55-56, NE 31-IV 389, 390, 391 et la vue Landsat du 8 mai 1973 scène 206-048 (cf. photo couleurs, hors-texte, figure 72)

Le plateau de Tajinjer correspond à la surface paléocène, découverte à son extrémité nord, recouverte de sable au sud. L'étude ci-dessous se situe dans la partie extrême de cette avancée sableuse au nord.

Sur photographies aériennes, les dunes se présentent sous la forme de hauts édifices allongés, apparemment dénudés mais la qualité des clichés ne semble pas suffisante pour faire apparaître une formation herbacée discontinue ; les dunes présentent sur leurs flancs des traces d'érosion linéaire ; ces traces — ou des nuances dans le couvert herbacé présumé — différencient les pentes dunaires en plusieurs tons de gris, les parties les plus claires se trouvant à la base des dunes au contact direct des parties les plus sombres des bas-fonds, ce qui avive le contraste entre les deux composantes.

Les bas-fonds sont vastes, de dimensions et de formes irrégulières. Ils sont bordés d'une végétation dense, absorbante ; les zones sans végétation paraissent argilo-sableuses, la brillance y est plus élevée que celle d'argiles de bas-fonds « classiques » ; des taches très claires y apparaissent qui sont des formations carbonatées et salines.

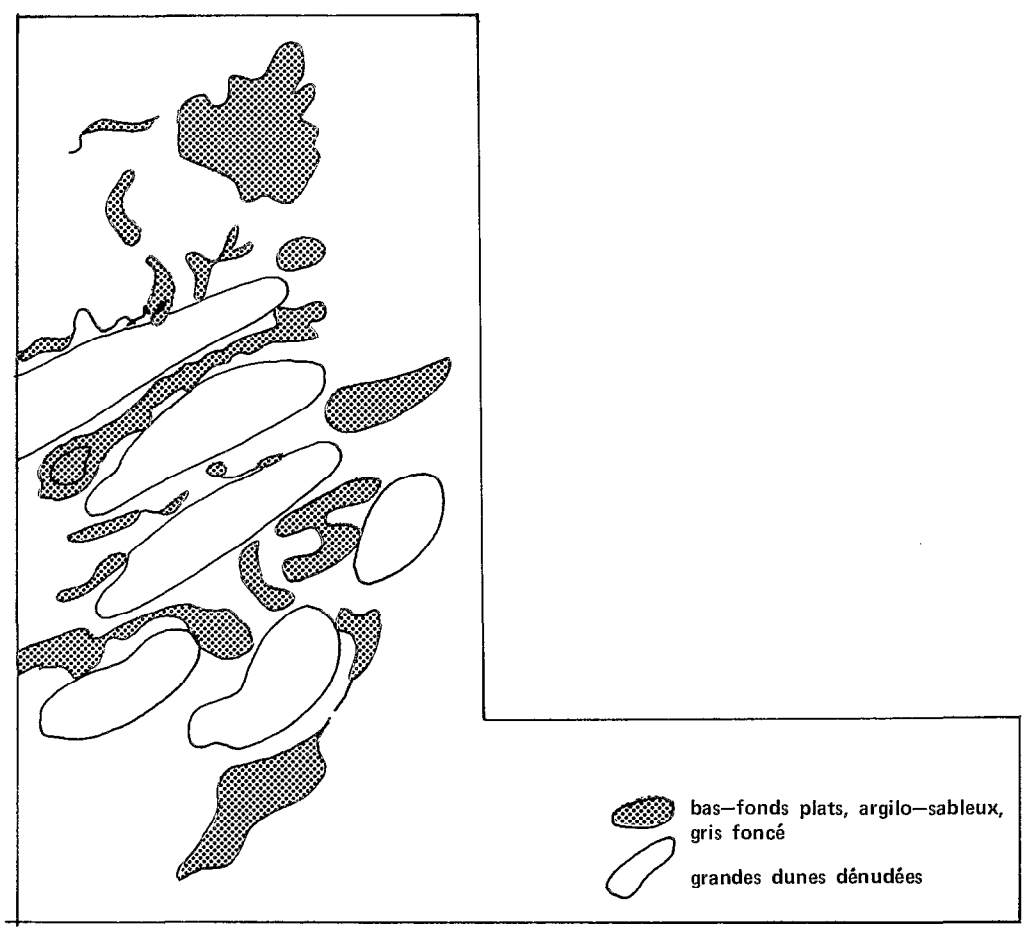


Figure 43 - Tajinjer, croquis d'après photographies aériennes AOF 55-56 NE 31-IV, 390

FIGURE 44 – TAJINJER : nuances dunaires

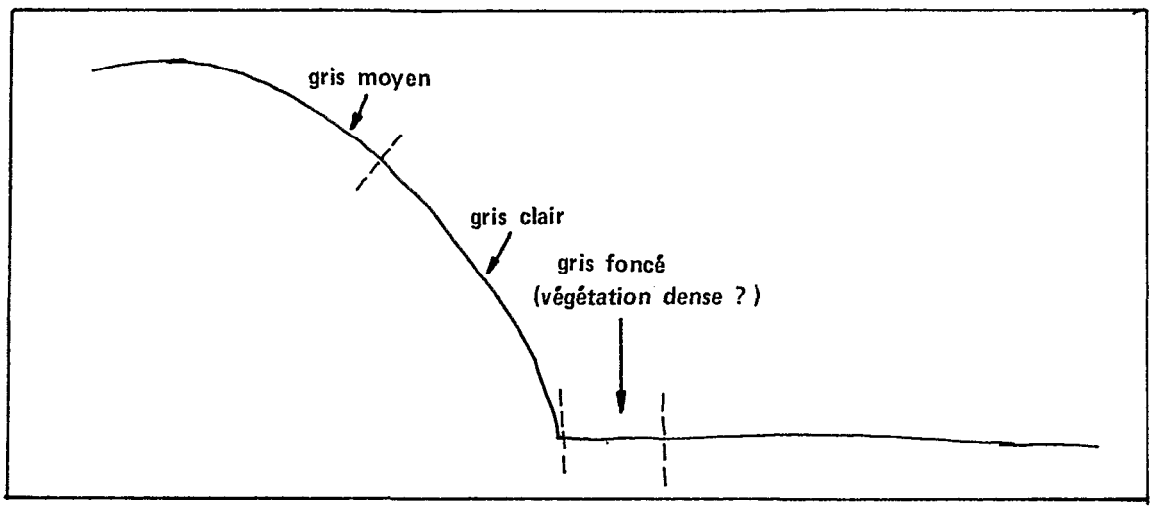


Figure 44 - Tajinjer : nuances dunaires

Sur l'image Landsat, texture et teintes rendent compte, avec moins de précision certes, de cette répartition. La texture est ondulée, à deux composantes dominantes, l'une de couleur brun orangé, l'autre violette.

Les aires orangées correspondent aux aires sableuses avec de fortes réflectances dans les canaux 7 et 5, une réflectance moindre dans le canal 4 ce qui suggère des sables et une végétation non arborée.

Les aires violettes correspondent aux bas-fonds qui seraient ici non pas des bas-fonds argileux de type montmorillonite ou illite mais des produits détritiques directement issus des formations lithologiques du plateau ou même les formations cénomano-turoniennes en place : les mêmes teintes violacées se retrouvent dans les contours du plateau au niveau de la cuesta. Le plateau de Tajinjer et ceux qui l'encadrent à l'ouest et à l'est (Kahal Sessao, Kahal Mentes, Kahal Midal) seraient ainsi des buttes-témoin de la formation paléocène encadrées par les formations cénomano-turoniennes calcaires et argilo-calcaires :

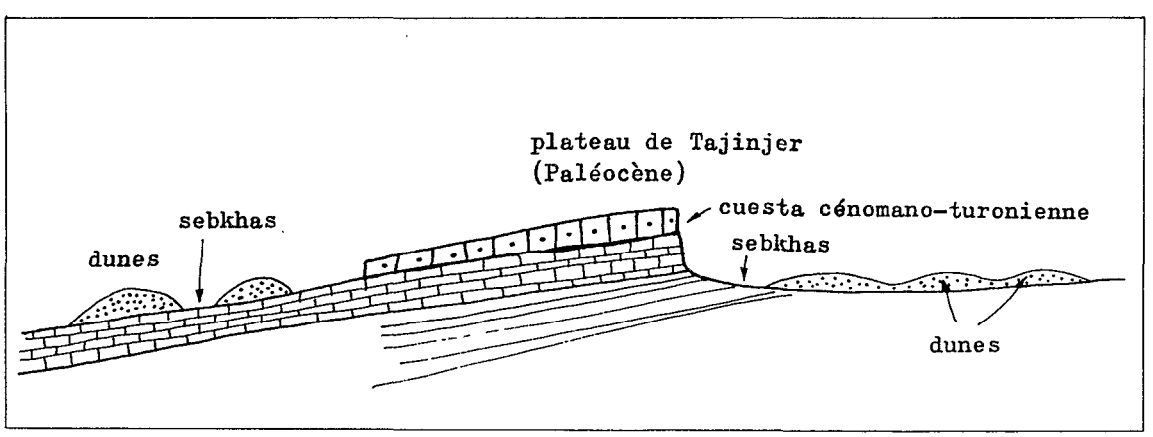


Figure 45 - Tajinjer, coupe de la cuesta

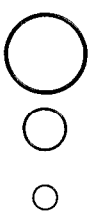
Le contraste est bien net entre les aires dunaires et les bas-fonds, souligné par un mince trait violet plus foncé : peut-on identifier cette ligne avec la ligne de végétation plus accentuée dans le canal 5 qui borde les bas-fonds ? La basse réflectance dans le canal 7 paraît anormale pour de la végétation à moins que l'on ne considère que cette formation présente des secteurs actifs ou vifs (canal 5 discriminant) et des secteurs morts (canal 7 discriminant) ?

Dans les aires dunaires, on peut distinguer des bandes plus claires : s'agit-il du contour des dunes, à réflectance plus élevée ? Une étude beaucoup plus fine sur données numériques au pixel près donnerait sans doute des éléments de réponse...

Le tableau ci-après résume les modes de représentation des formations de surface rencontrées dans les pays de l'Azawagh, d'après l'intensité de réflectance et le canal discriminant des données Landsat :

Intensité de réflectance :

Intensité de discriminance par rapport aux autres canaux :



Thèmes	canal 4	canal 5	canal 7
Sables nus	○	○	○
Sables peu couverts (végétation discontinue)	⊘	⊘	○
Argiles lisses	⊘	⊘	○
Argiles moyennes	⊛	⊛	○
Montmorillonites	◕	◕	⊛
Regs moyens	⊛	⊛	◕
Regs sombres	●	●	●
Roches vernies, éboulis de cuirasses	●	●	●

1.5. LES FORMATIONS DE SURFACE SUR LES DONNEES DE SIMULATION SPOT

Les caractéristiques des bandes spectrales des satellites Landsat et Spot sont voisines. C'est la résolution spatiale des données de simulation Spot, nettement plus élevée (20 mètres) que la résolution Landsat, qui peut introduire des différences entre les 2 types d'images.

La courbe radiométrique des axes choisis met en évidence les rapports entre les trois bandes spectrales et des éléments de texture. L'une de ces courbes est reproduite p. 111 (axe TT') ; une autre est reproduite ci-après (axe SS'). La zone est restituée sous forme de composition colorée (1) numérique (cf. photo couleurs, hors-texte, figure 73).

Les deux axes traversent successivement, de l'ouest à l'est :

— un reg verni, très entamé par un réseau hydrographique sur T, plus compact sur S ;

— une large vallée sableuse, celle du kori Tyeral, l'un des constituants de l'Eghazer wan Agadez dont l'axe central est occupé par une végétation herbacée et arborée visibles et dont les terrasses sont remaniées en dunes orientées approximativement est-ouest ;

— un reg compact.

Les regs sont très absorbants dans le canal 3, un peu moins dans le canal 2. Sur la rive droite du Tyeral, ils sont abondamment disséqués par l'érosion, ce qui donne une texture à éléments contrastés : les talwegs sont soulignés par le sable très réfléchissant des fonds de vallons.

C'est donc dans une certaine mesure la *texture,* c'est-à-dire l'arrangement des pixels de valeurs radiométriques différentes et le contraste entre ces valeurs (bien visible sur les courbes TT') qui identifie le thème *reg* en suggérant indirectement le relief avec beaucoup plus de détails que l'image Landsat. Sur l'image Spot les vallons étroits et la digitation des réseaux hydrographiques sont bien visibles ; sur l'image Landsat, ils apparaîtraient seulement sous forme de « valeurs de bordure » (semblables aux « bordures » des plateaux vernis d'Izadelagan et Anyokan) sans différenciation des *formes.*

Sur les courbes SS', la valeur radiométrique des regs s'élève quand on s'éloigne de la vallée principale (segments a et h) : la radiométrie dans le canal 3 se rapproche alors de celle des canaux 1 et 2 qui sont, eux, confondus notamment dans le segment h. Il est possible que l'accroissement de réflectance dans le canal 2 traduise une plus grande proportion d'*argiles* dans la formation de surface correspondante et un vernis moins sombre ; ceci semble confirmé par les observations de terrain. Les secteurs les plus absorbants des regs sont alors les *pentes* (segments c et e des courbes radiométriques SS').

Les sables dénudés ou peu couverts d'une végétation herbacée sèche des terrasses récentes du kori Tyeral sont nettement marqués par des réflectances très élevées dans tous les canaux ; sur les courbes, les canaux 1 et 2 sont confondus, le canal 3 est à peine inférieur. Un examen détaillé au pixel et à l'unité de niveau radiométrique près aurait-elle fait apparaître les secteurs à rides éoliennes de ces terrasses ? La composition colorée numérique ne montre à cet égard aucune différence entre les sables ridés et les sables lisses sinon, sur la rive gauche, des indices ténus d'orientation de la végétation...

L'image Spot montre l'organisation générale des sables avec une précision beaucoup plus grande que l'image Landsat : sables alluvionnaires de la vallée de Tyeral ; sables vraisemblablement éoliens puis remaniés par l'écoulement ou simplement piégés par le relief des réseaux autrefois affluents ; barrage en travers de la vallée principale. Ce dernier est particulièrement remarquable. Il semble qu'une longue dune rectiligne ferme la vallée, retenant l'humidité des écoulements saisonniers : en effet, les surfaces végétales (rouges, orangées et violettes sur la composition colorée) en amont du « barrage » contrastent avec la simple linéarité du secteur aval. Or les photographies aériennes examinées en stéréoscopie ne montrent aucun relief au niveau du présumé barrage : cette masse sableuse n'est pas une dune à proprement parler.

La raideur du contact, le contraste entre les deux unités et l'orientation peuvent faire penser à une origine structurale commune à la région toute entière : l'orientation est celle de la bordure du massif ancien au nord, de la cuesta au sud, des lignes de fracture marquées par des alignements de buttes dans le bassin

(1) Canal 1 en *jaune*, canal 2 en *rouge*, canal 3 en *bleu*.

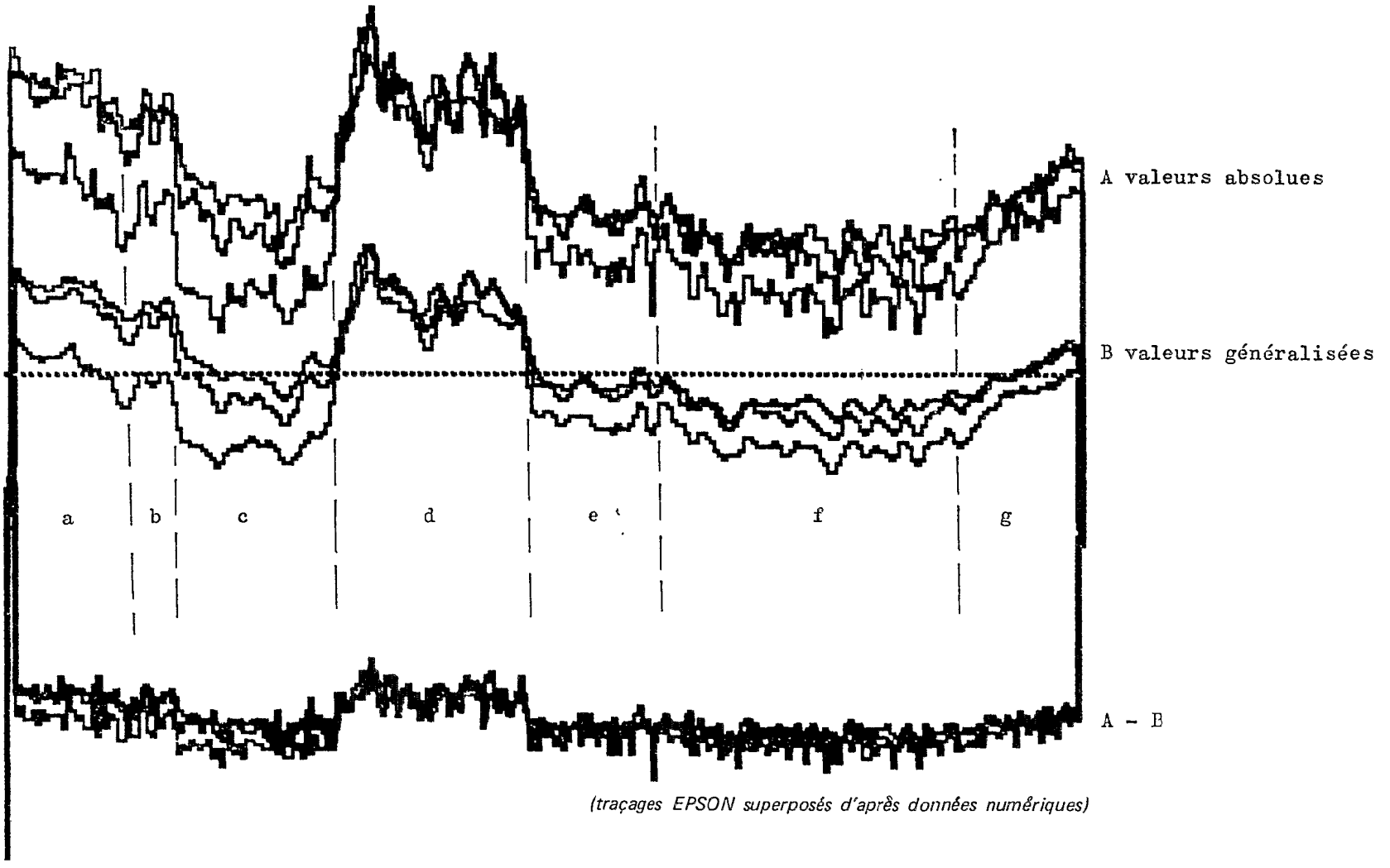


Figure 46 - Simulation spot, courbe des valeurs radiométriques, axe SS'

des argilites et par les vallées de la Tadarast (Tadist, Shi Walemban, Shi Kulenin). Mais c'est aussi celle des dunes récentes du panache sableux qui contourne l'Aïr par le sud. Il est possible que les deux explications se combinent et que les ensablements récents soient particulièrement marqués et abondants dans des « couloirs » plus anciens.

Il est remarquable que cet aspect de la présence sableuse ne soit guère visible sur les données Landsat : l'orientation générale est certes distincte mais dépourvue de la netteté de contraste des données Spot.

2. LA VEGETATION

L'ensemble des manifestations végétales est plus complexe à cerner au moyen des données Landsat que l'ensemble des formations de surface. Ceci pour plusieurs raisons :

— la définition Landsat ne restitue pas un objet végétal mais un ensemble d'objets, de même nature ou de nature différente sans distinction *a priori* ;

— les unités de paysage végétal sont susceptibles de varier dans le temps, d'une saison à l'autre (le contraste entre situation de saison sèche et situation de saison des pluies est une évidence) et d'une année à l'autre selon les facteurs climatiques ;

— hors de toute variation climatique, les unités de paysage végétal sont d'une grande variété selon la latitude, le sol, le relief, les interventions humaines et animales...

C'est pourquoi, plutôt que de rechercher *l'interprétation précise* des divers faciès radiométriques végétaux ou présumés végétaux, on a cherché d'abord à classer la végétation sahélienne d'après des observations de terrain et l'examen des échantillons de photographies aériennes en termes de contrastes de couleur et en termes de résolution au sol du pixel Landsat ; ensuite seulement, on a recherché sur les images Landsat comment ces catégories étaient « traduites » et leurs nuances éventuelles.

Le premier terme de cette classification aborde successivement :

— les formations fermées : forêts et prairies ;

— les formations ouvertes contractées, herbacées et mixtes (herbacées et ligneux) ;

— les formations hétérogènes régulièrement réparties dans l'unité géographique : organisation dunes - bas-fonds et brousses tigrées....

Le second terme de notre classification sépare les formations végétales ligneuses des formations végétales herbacées : les premières ont une brillance faible, des couleurs gris-vert et gris ; les secondes ont une brillance très élevée, en particulier en saison sèche où leur couleur devient gris clair, jaune clair ou jaune paille. En saison des pluies, le contraste ligneux-herbacées disparaît pour faire place aux verts éclatants de l'activité chlorophyllienne.

Ces classifications ont l'avantage de recouvrir les classifications vernaculaires par les pasteurs nomades, qui conçoivent entre autres le fait végétal en termes d'abondance (la densité du couvert), de variété des ressources (les territoires mixtes), de durabilité en saison sèche (le rapport herbacées — inégalement durables — et ligneux — durables).

Cette approche de la végétation donne l'occasion de citer de nombreux exemples : leur abondance est le reflet de l'extrême variété des formes d'adaptation de la végétation à des conditions édaphiques irrégulières, dans lesquelles se combinent les facteurs de cohérence et de granulométrie des éléments du sol, la pente, l'érosion linéaire et l'érosion éolienne... tous éléments inégalement restitués par les images Landsat.

2.1. LES FORMATIONS VEGETALES FERMEES

Le terme de *formations fermées* peut paraître ici abusif : nous entendons par ce terme non seulement des formations couvrant réellement la totalité du sol visible par un observateur placé sur le terrain, mais aussi des formations qui ne laissent pas de sol visible au point de vue de l'observateur placé au zénith. Cela inclut ici les *prairies* et les formations *agoras* du Sahel sub-saharien, formations arborées à couronnes jointives et au sol presque dénudé.

Sous cette définition, les formations fermées sont peu nombreuses et bien délimitées dans des niches écologiques très précises.

2.1.1. Les formations arborées fermées de type agoras

Les *agoras* sont des formations presque exclusivement arborées, à couronnes jointives, spécifiques des zones sèches du nord des pays de l'Azawagh et en particulier du bassin de l'Eghazer. Elles s'établissent sur les nappes d'inféroflux des cours d'eau descendant du massif de l'Aïr (relativement bien alimentées, davantage en tous cas que tous les autres axes hydrographiques à la même latitude) et s'allongent dans les vallées. On rencontre la plupart d'entre elles au débouché du massif sur les sables de la formation des *grès d'Agadez* et sur les sables alluvionnaires qui rassemblent des conditions favorables. Les arbres sont de taille moyenne : 3 à 10 mètres de hauteur, principalement *Acacia ehrenbergiana* et *Acacia raddiana*. Au sud du bassin de l'Eghazer, ces forêts se développent dans les grandes vallées de la Tadarast autour des mares quasi-permanentes : *Balanites aegyptiaca, Maerua crassifolia, Ziziphus mauritiana* y apparaissent alors en grand nombre.

Les *agoras* sont très fréquentées par les pasteurs même lorsqu'elles sont censées être « protégées » par les services des Eaux et Forêts car elles procurent ombre et fraîcheur aux hommes, pâturages permanents aux troupeaux (1) et l'eau n'y est jamais loin en profondeur...

Les agoras sont très distinctes sur les données Landsat en raison de leur réflectance et de leur forme. Les réflectances sont faibles et inégales au sein de l'unité surtout dans le canal 5 ce qui leur donne sur les compositions colorées une teinte qui va du rouge sombre au rouge orangé, contrastée par rapport au voisinage (sables très brillants) beige clair. C'est la seule unité qui présente ces caractères radiométriques dans tout le bassin de l'Eghazer et elle est impossible à confondre avec d'autres. La forme allongée des agoras et leur position sur les axes hydrographiques qu'elles soulignent, ou dont elles soulignent les confluents, les rend parfaitement identifiables.

Les agoras se situent principalement sur les sables, lesquels possèdent une capacité de rétention d'eau élevée et favorisent la circulation de la nappe superficielle, où les racines peuvent s'enfoncer verticalement et horizontalement. On connaît cependant une agoras dans la zone des argilites, à Fagoshia, plus maigre et plus clairsemée il est vrai que ses semblables sur sables. L'agoras de Fagoshia n'est pas visible sur les compositions colorées de la région (scène 204-048) quelle que soit la date d'enregistrement. Ce peut être dû à la maigreur du feuillage au moment des enregistrements (saison sèche) ; à l'absence de contraste entre les réflectances dominantes des argiles, faibles dans les canaux 4 et 5, plus élevées dans le canal 7 et les réflectances dominantes des arbres jointifs, faibles dans le canal 5, plus fortes dans le canal 7 ; à la forme de l'agoras, indistincte ici dans les méandres du kori autour des crêtes d'argilites. Enfin, la réflectance ordinairement basse des formations arborées peut-être ici — et cela ne se rencontre que sur milieu argileux — « éclaircie » (donc confondue avec ce milieu) par un phénomène que nous avons observé sur place : le terrain argileux est abondamment piétiné tout autour des arbres par les animaux qui les ont pâturés. Mais au pied même des arbres, à l'abri des branches basses épineuses qui empêchent les animaux d'approcher du tronc, s'est constituée une auréole d'argile fine, faiblement craquelée, claire, brillante : même sur des unités de petite dimension, la réflectance de l'ensemble peut en être modifiée.

---

(1) Les frondaisons des arbres et des arbustes constituent en elles-mêmes un pâturage pour les chèvres et surtout pour les chamelles ; les feuilles ont sur les herbes l'avantage d'être appétentes et consommables toute l'année.

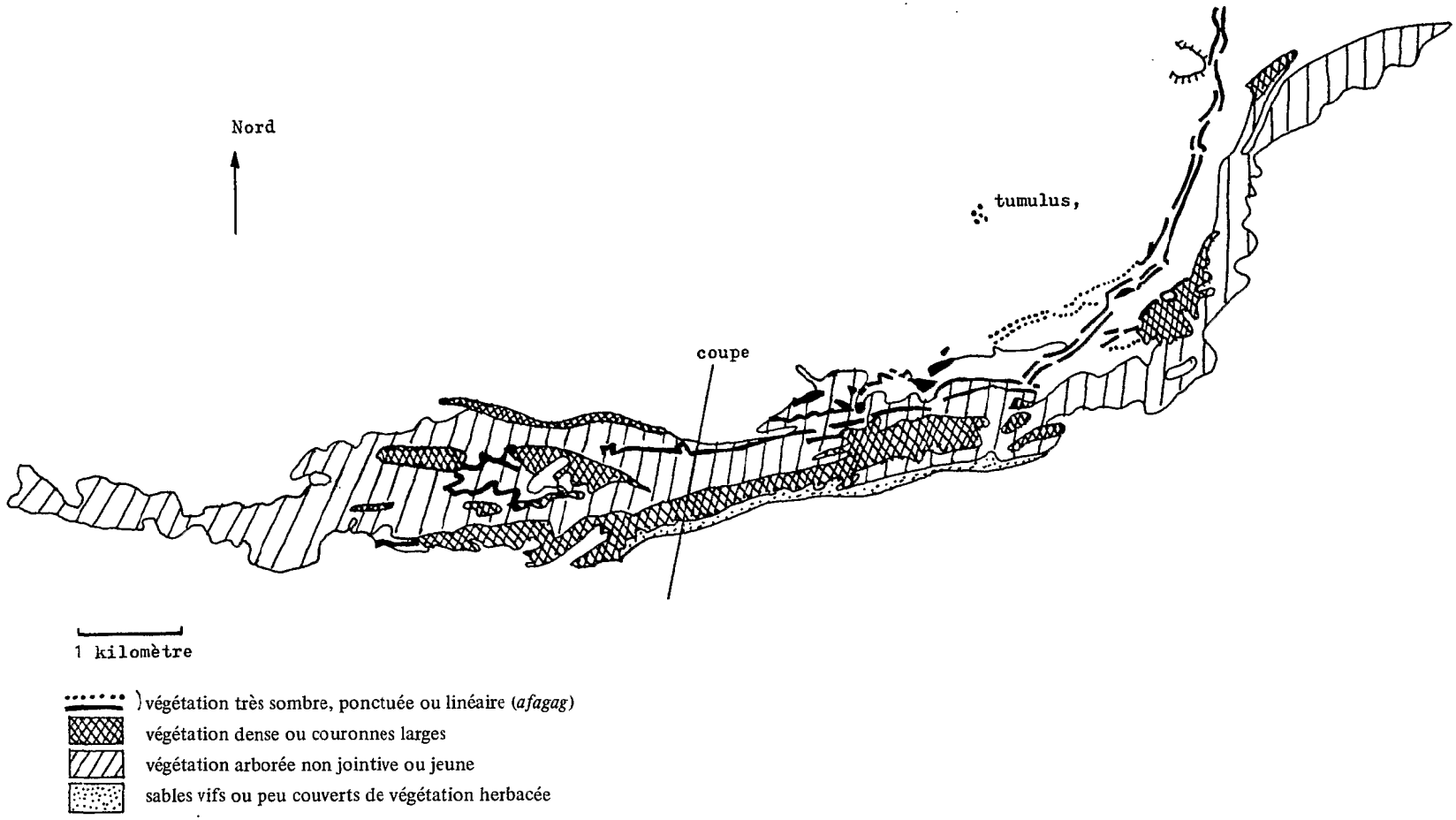


Figure 47 - Forêt de Kerbubu, croquis d'après photographies aériennes NIG 80

On va voir dans l'exemple qui suit que, à l'intérieur de l'aire forestière d'une agoras typique, des nuances de densité, de taille des couronnes, voire des différences entre les essences peuvent être repérées sur image Landsat, avec prudence toutefois.

L'agoras de Kerbubu (feuille *Agadès*) d'après les photographies aériennes 80-NE II/500 (1980, 1/50 000), les données numériques de la vue du 12 janvier 1976, scène 204-048 et nos observations sur le terrain (cf: figure 74 hors-texte).

La forêt de Kerbubu est installée sur la nappe d'inféroflux du kori Telwa, et commence à une vingtaine de kilomètres en aval de son débouché dans la plaine. La formation végétale profite d'une alimentation irrégulière mais notable. En amont de la forêt, le Telwa se divise en deux bras, aux lits anastomosés et instables, enserrant la forêt. Son extrêmité aval correspond au secteur extrême d'aboutissement des crues. En 1975 et 1976, certains secteurs de la forêt ont fait l'objet de travaux de génie civil sous la forme de petits barrages de terre destinés à empêcher les crues de progresser plus loin vers l'aval sans profit pour la végétation.

En principe, la forêt est « protégée », c'est-à-dire que pâtures et coupes de bois y sont, sinon interdites, du moins contrôlées ; en fait, la présence de trois puits importants attire de nombreux pasteurs nomades et la proximité de la ville d'Agadez à une quinzaine de kilomètres, grande consommatrice de bois domestique, entraîne une exploitation plus ou moins clandestine.

Les espèces les plus couramment rencontrées sont, approximativement par ordre d'importance : *Acacia ehrenbergiana (tamat), Boscia senegalensis (tadant), Acacia raddiana (afagag), Maerua crassifolia (aggar) et Balanites aegyptiaca (aboragh)* (1)...

La densité des individus et la taille des couronnes sont variables mais montrent, sur les photographies aériennes récentes, une couverture supérieure à 50 %. Par endroits, les couronnes sont réellement jointives, groupées en masses compactes allongées, ou alignées en bordure des axes d'écoulement régulièrement fonctionnels.

La forêt de Kerbubu est, comme toutes les agoras, une formation très dynamique : selon la position et la charge de la nappe d'inféroflux, des secteurs entiers se dégradent et meurent, d'autres voient apparaître un recru très spectaculaire de la végétation ligneuse sous la forme de milliers de jeunes arbres du même âge en groupements denses et quasi-jointifs.

L'orientation est-ouest et l'organisation linéaire de la formation forestière de Kerbubu ne sont pas très favorables à une restitution précise par les données Landsat, sur lesquelles le lignage est gênant dans ce cas... Nous avons néanmoins recherché sur les données numériques des nuances dans la végétation et nous les avons comparées avec les photographies aériennes et les observations de terrain (1980 dans les deux cas) ; les données numériques datent de 1976, c'est-à-dire qu'un délai de quatre années s'est écoulé entre les deux séries, délai suffisamment long pour que certains aspects forestiers se soient modifiés, sous l'action des travaux effectués notamment.

Dans le canal 4, le lignage intense de l'image, parallèle à l'orientation générale de la formation, empêche toute analyse pertinente. Le canal 5 montre une intensité d'absorption croissante depuis la périphérie jusqu'au centre, selon une répartition qui est assez proche du croquis d'interprétation des photographies aériennes de la figure 47 ; cependant, les linéarités plus denses de la partie nord-est n'apparaissent pas. Le canal 6 présente une image relativement proche de celle du canal 5, plus rudimentaire semble-t-il et moins proche des photographies aériennes dans la partie ouest mais offrant davantage de finesse et des ébauches de linéarité dans la partie nord-est : il faut remarquer toutefois que le canal 6 est lui aussi très ligné. Le canal 7 semble ne présenter aucun intérêt.

Le regroupement simple de niveaux radiométriques ne donne donc pas de résultats suffisamment fins et c'est chaque tache élémentaire qu'il convient de prendre en compte, en position et en valeur radiométrique.

---

(1) Les noms entre parenthèses sont les noms *tamasheq* de ces arbres. Notons que la forêt de Kerbubu est très abondamment fréquentée par les pasteurs Peuls.

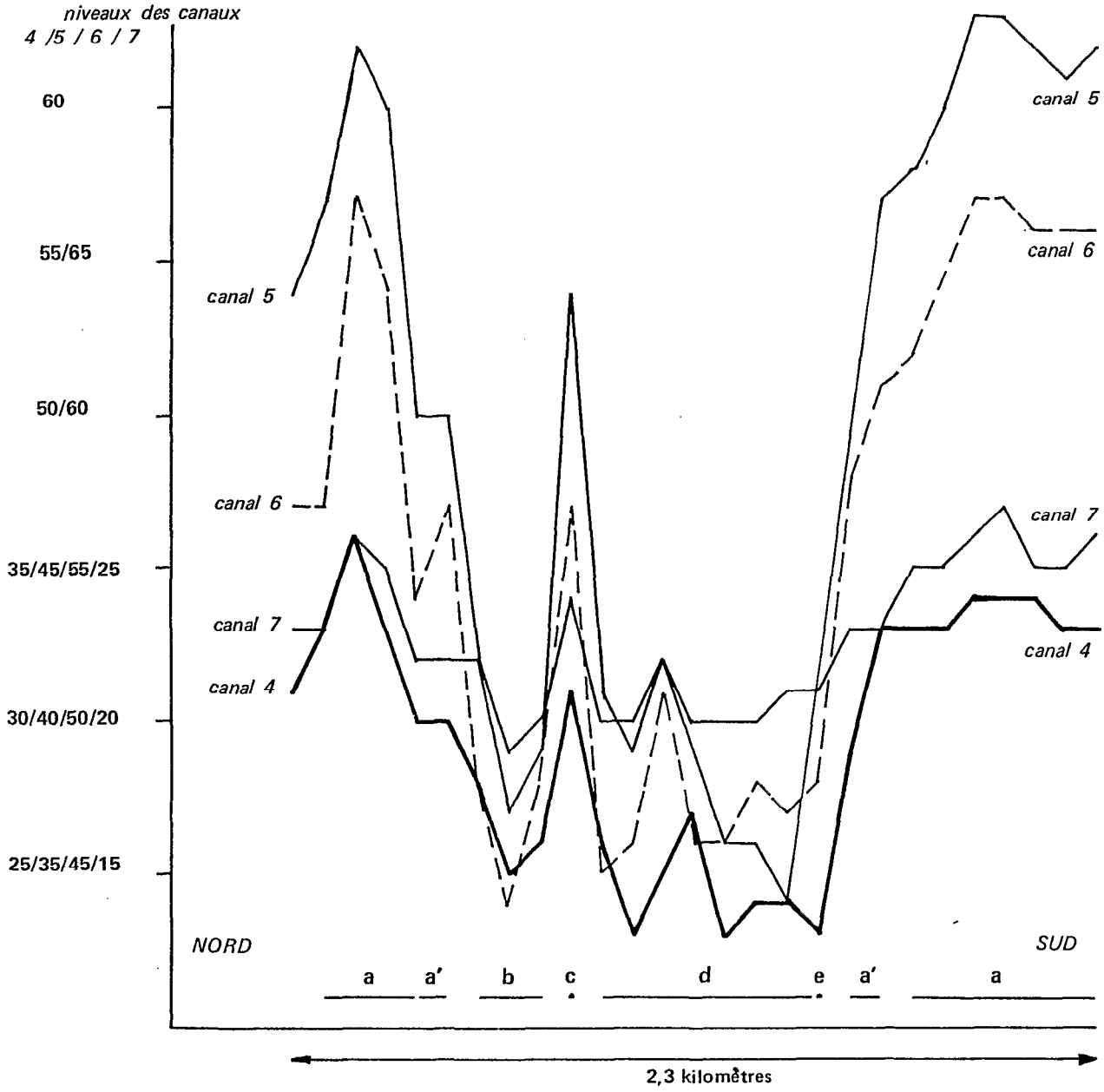


Figure 48 - Forêt de Kerbubu, courbes des valeurs radiométriques

Pour cela, nous avons effectué une coupe radiométrique transversale (figure 49).

a. Les hautes réflectances dans les quatre canaux correspondent aux prairies à *Schoenfeldia, Aristida* et *Panicum turgidum* en formations discontinues sur sables, caractéristiques des *grès d'Agadez*.

a'. Aire à couvert arboré perceptible mais faible : arbres espacés ou peu feuillus sur la frange forestière, zone de dégradation de la forêt par manque d'eau ; les observations de terrain ont fait ressortir que la végétation est plus dense et en meilleur état sur la frange sud-est et sud-ouest de la forêt que sur la frange nord.

b. Zone forestière à forte absorption, surtout dans le canal 6, qui dépasse les autres canaux. Elle peut correspondre avec la ligne d'*Acacia raddiana* qui borde l'axe d'écoulement nord ; ces peuplements d'*Acacia raddiana* présentent une très forte absorption sur l'émulsion panchromatique des photographies aériennes.

c. Zone semblable à a' mais de réflectance moindre dans chaque canal : couverture arborée moins dense ? ou bien ce point correspond-il au franchissement du kori, très brillant (sables alluvionnaires dénudés) mais de faible largeur (50 mètres au plus) tout en étant influencé par les basses réflectances du voisinage immédiat ?

d. Zone forestière principale, plus large et plus dense que b, présentant des irrégularités de réflectance ; celles-ci peuvent s'expliquer par des différences de densité arborée dans le détail ou par les différences de réflectance des couronnes d'espèces différentes *(Acacia ehrenbergiana,* plus clair, *Acacia raddiana* et *Maerua crassifolia,* plus sombres).

e. Zone forestière de type b, très absorbante. Elle peut correspondre à un accroissement de densité dans la zone sud de la forêt, où se trouvent les secteurs les plus actifs et les aires de recru.

La bordure a' du sud de la forêt, à l'emplacement de la coupe radiométrique semble correspondre à une zone en mauvais état au moment de la prise de vue Landsat, morte et en cours d'ensablement au moment des observations de terrain.

Les données numériques ne semblent pas rendre compte de deux thèmes observés sur le terrain : un thème *arbres morts et coupes* dans la partie centrale de la forêt, visiblement en cours d'exploitation en 1981 ; un thème *forêt morte sur sables vifs* dans la partie méridionale centrale de la forêt.

On peut penser que ces deux thèmes, non spontanés car l'intervention humaine entre pour une grande part dans leur présence, n'existaient pas lors de l'enregistrement de janvier 1976. Il est possible aussi que le thème *coupes* se confonde avec un faciès de couvert discontinu, ou même un faciès de couvert car branchettes et brindilles couvrent le sol, le sable n'est pas à nu ; quant au thème *forêt morte sur sables vifs,* il n'a pas pu être identifié non plus dans la région d'Azelik, où il existe (mais existait-il en 1976 ?) : les hautes réflectances des sables vifs sont « amorties » par les bois morts et pourraient passer inaperçues dans des radiométries générales plutôt moyennes...

On peut évaluer la rapidité d'évolution du milieu forestier de Kerbubu grâce à deux observations.

La première compare le contour de la forêt sur la carte IGN à 1/200 000 (tracée d'après photographies aériennes de 1955-56) et le contour de la forêt sur un agrandissement à 1/200 000 des données photographiques Landsat du 12 janvier 1976 (figure 50).

Les extrémités se sont infléchies vers le sud, surtout l'extrémité occidentale : la nappe d'inféroflux n'est plus située exactement au même endroit qu'il y a trente ans, le cours inférieur du Telwa s'est raidi pour se diriger désormais directement vers l'ouest. On verra plus loin (chapitre *Hydrographie*) qu'il est vraisemblable que le Telwa rejoignait autrefois la région de Teggida n Adrar en se dirigeant vers le nord et qu'il reste des traces de cet ancien parcours, identifiées sur l'image Landsat. Jusqu'à une période récente, la végétation de la région de Kerbubu a conservé la forme visible de cet écoulement antérieur.

La seconde observation a été faite sur le terrain en comparant l'état du milieu en 1980 et une année après, en 1981. En 1981, au cours de la seconde visite, l'emprise des sables vifs a paru s'être accrue de

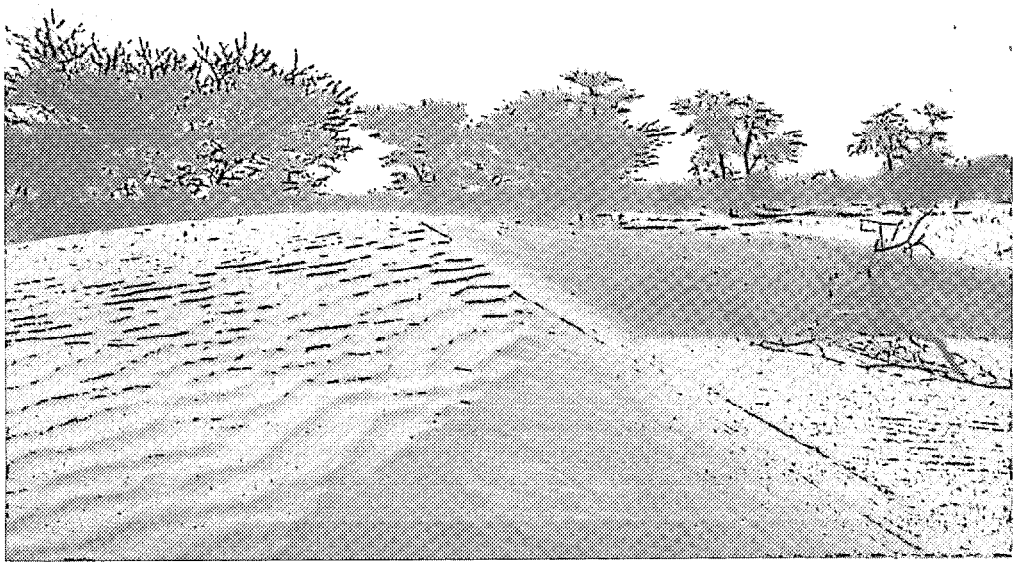


Figure 49 - Formation arborée dense : l'*agoras* de Kerbubu près d'Agadez. Ici, *Acacia ehrenbergiana* est exclusif, en peuplements d'individus de grande taille. La strate herbacée est réduite à l'état de maigre chaume par le broutage et le piétinement du bétail.
La remobilisation des sables : petite barkane à Kerbubu. La strate herbacée est inexistante ; la strate arborée est représentée ici par des *Acacia raddiana (afagag)* de grande taille, espacés.

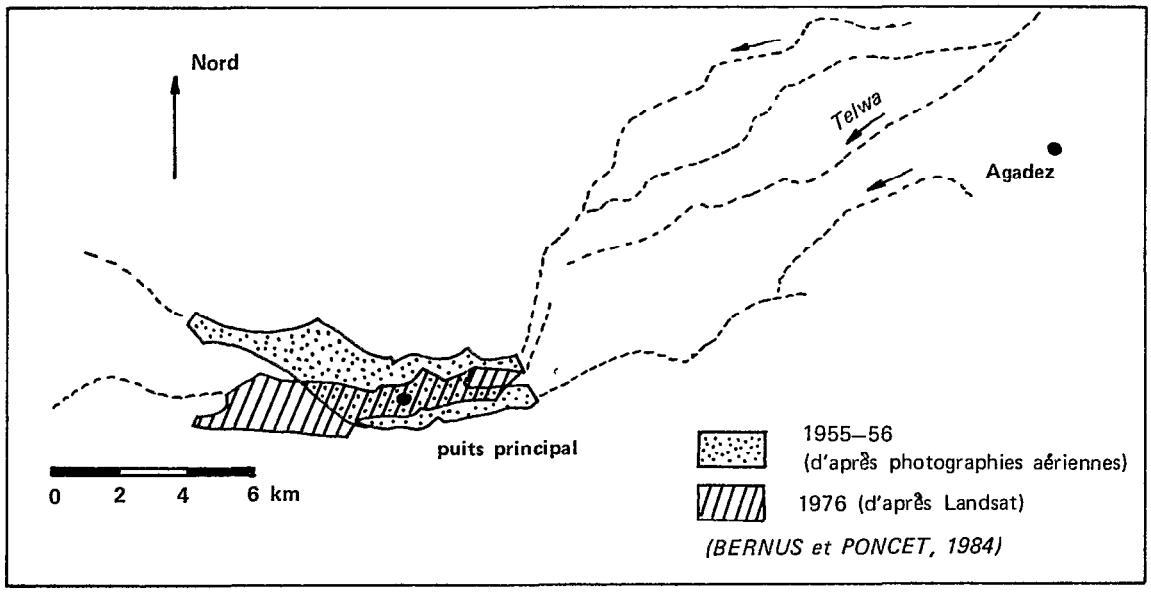


Figure 50 - Evolution de l'aire forestière de Kerbubu

manière importante : dans la zone nord de la forêt, les dunes vives, sous forme de petites barkanes, étaient devenues nombreuses entre les arbres même ; il est vrai que cette seconde observation a été effectuée immédiatement après trois jours de vent de sable qui avaient sans nul doute contribué à remobiliser des sables découverts.

Dans la zone sud de la forêt, un secteur qui en 1980 se présentait sous la forme d'un « couvert » d'arbres adultes, sur pied mais dépourvus de feuilles et de fleurs et présumés morts, ne subsistait plus en 1981 que sous la forme de souches et de troncs morts, envahis par les sables vifs : les véhicules qui empruntent la piste directe In Gall - Agadez longeant ce secteur avaient dû profiter de la mort réelle ou apparente (1) des arbres pour effectuer, à destination de l'une ou l'autre ville, de fructueux chargements de bois...

Les agoras sont donc des formations dynamiques, susceptibles de changer rapidement de forme et de faciès selon les conditions hydriques et végétales du moment. Les arbres qui les forment, souvent nés tous en même temps de conditions particulièrement favorables, meurent souvent tous en même temps, à la suite du détournement naturel de la nappe qui les alimente ou, plus simplement, de vieillesse simultanée (2).

2.1.2. Les formations fermées, spontanées, étagées du sud et les jachères

A l'extrême sud de l'aire étudiée, sous un climat de type sahélo-soudanien de 700 à 800 mm de pluie en moyenne, les formations fermées et étagées (arbres, arbustes, strate herbacée) sont présentes sur tous les secteurs non cultivés.

---

(1) Il est fréquent que des arbres, insuffisamment ravitaillés en eau pendant une, deux ou trois années, « se mettent en sommeil » comme font, en hiver, les essences caduques des pays tempérés.

(2) A. Granier, communication orale, et Bernus et Poncet, 1984.

Sur les compositions colorées à 1/500 000, ces formations se présentent sous la forme d'unités très absorbantes dans les canaux 4 et 7, dépourvues de texture visible. Elles sont souvent bordées par le cerne noir caractéristique des plateaux cuirassés qui explique leur présence : les sols n'y sont pas cultivables. Des faciès plus absorbants dans le canal 7 n'ont pas été formellement interprétés : correspondent-ils à des incendies ? Ce serait plausible par la situation géographique, la réflectance et la saison de prise de vue (mars 1976) mais guère par l'extension, trop considérable. Correspondent-ils à des secteurs plus denses, plus élevés de la forêt ? à une différence dans la répartition des essences dominantes sur un substrat différent ? Ce point n'est pas éclairci pour le moment.

Dans la zone agricole, la pratique de la jachère est tout à fait courante ; les durées sont variables selon les sols et les besoins en terre : en général, les parcelles de l'auréole agricole la plus éloignée du village sont cultivées pendant quatre à huit ans puis mises en jachères pendant la même durée. Nous n'avons pas recherché ici le moyen de différencier par les niveaux de réflectance et par les textures, les jachères de la brousse non cultivée... Les opérations de recensement agricole effectuées à partir des photographies aériennes à 1/20 000 dans la région de Dosso ont montré que c'était là tâche délicate, même sur photographies aériennes et qui donnait des résultats de fiabilité variable. Au demeurant, cette discrimination n'entrait pas directement dans notre propos, mais il convient de signaler que les jachères sont une forme de végétation très couvrante, associant buissons et arbustes à une strate herbacée très dense. Il est possible que des études fines — sur données numériques par exemple — les mettent en évidence grâce à une restitution multispectrale fine.

2.1.3. Les formations hydromorphes

Dans les grandes vallées et notamment dans les grandes vallées méridionales se rencontrent des phénomènes d'hydromorphie, sinon permanente, du moins prolongée très au-delà de la durée de la saison des pluies ; les faciès végétaux se distinguent par une activité chlorophyllienne prolongée et par une très forte densité des ligneux (arbustes et buissons plutôt que grands arbres) constituant des fourrés peu pénétrables.

Au sud du 13e parallèle, l'activité chlorophyllienne quasi-permanente se manifeste sur les compositions colorées par une très forte absorption dans le canal 5 et lui seul, donnant une couleur rouge vif aux unités concernées. C'est le cas, sur les rives du fleuve Niger, des prairies de *borgou (Echinochloa stagnigna sspp)* et des rizières ; de la canne à sucre et des arbres fruitiers, manguiers surtout, du Dallol Mawri et de la vallée de la Sokoto.

Au fur et à mesure que l'on s'avance vers le nord, l'hydromorphie se réduit dans le temps et sans perdre de sa densité, la végétation marque une moindre activité. Les réflectances restent basses dans le canal 5 et le deviennent dans les autres canaux, marquant l'importance des éléments secs et non actifs. A la latitude de Filingué (14° 30') les aires de stagnation de l'eau sont marquées par des réflectances basses contrastant avec le voisinage (sables plus ou moins dénudés des aires cultivables) mais cette végétation n'est pas identifiée : il n'est pas facile de faire la différence entre elle et les surfaces argileuses — à réflectances basses également — sur lesquelles ou en bordure desquelles elle se trouve. La structure en « flammes » des aires hydromorphiques est caractéristique de la vallée de l'Azawagh et traduit une hydrographie particulière.

2.1.4. Les formations herbacées fermées de l'Eghazer wan Agadez

Les images photographiques du bassin de l'Eghazer wan Agadez (scène 204-048) montrent, dans la zone des argilites généralement sombres, des croissants et des festons très brillants, très réfléchissants dans tous les canaux y compris le canal 4. Il s'agit d'une formation herbacée d'annuelles *(Aristida sspp)* d'autant plus couvrante que les tiges minces et sèches se brisent sous le vent et constituent un feutrage serré.

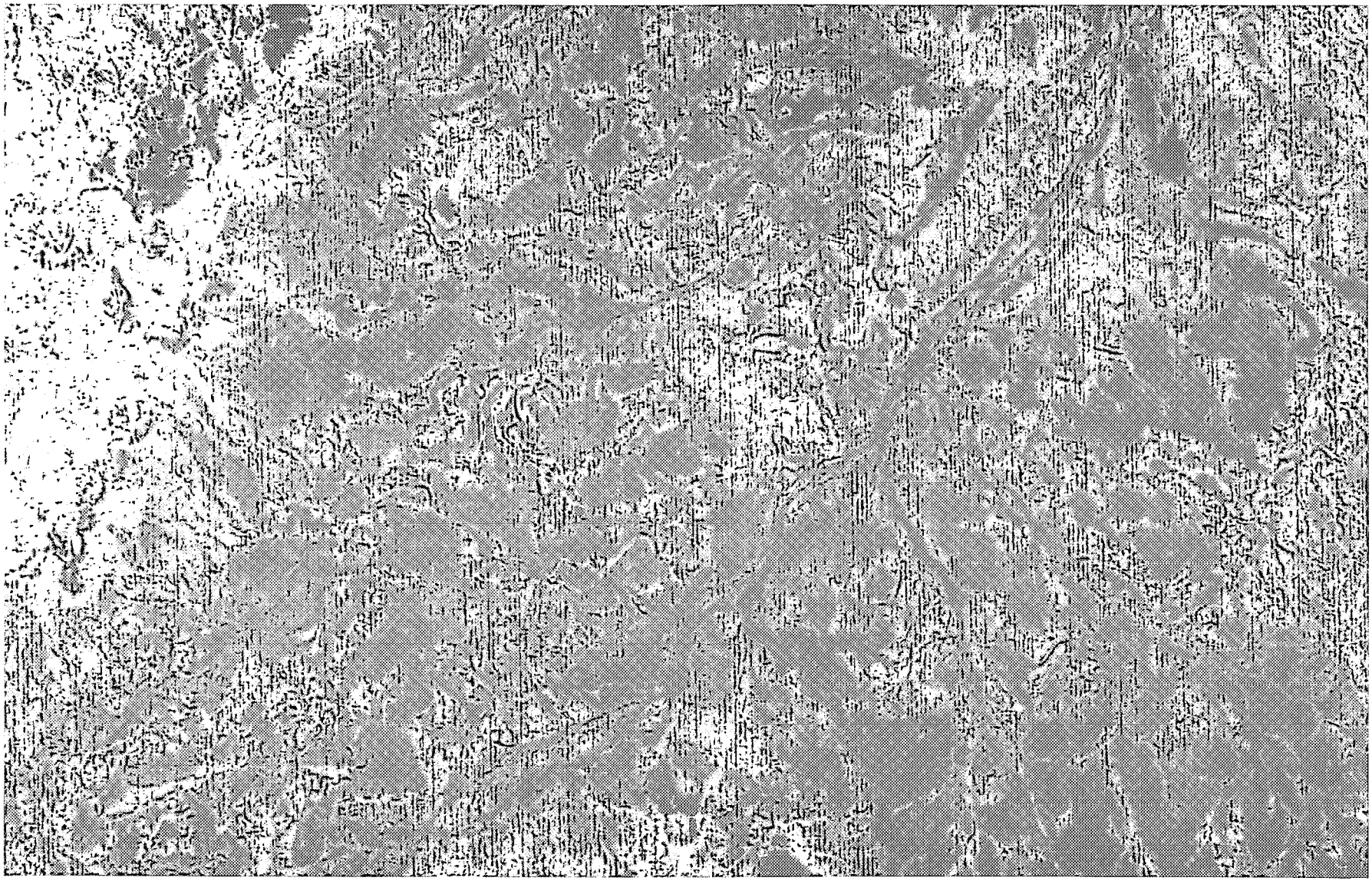


Figure 51 - Image Landsat : festons de végétation réfléchissante soulignant le pied des talus, scène 204-048, vue du 12.01.76, traitement photographique, canal 7, 1/500 000, image partielle.

Dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez, les prairies à *Aristida* sont caractéristiques des aires argileuses et argilo-sableuses bien drainées du bas des pentes ; sur les images Landsat, elles soulignent de façon éclatante le pied des talus et des plateaux en festons caractéristiques. Davantage que leur réflectance propre — qui s'apparente de très près à celle des sables nus — c'est la forme des unités et la violence du contraste (surtout dans le canal 7) avec les argiles sombres qui en permet l'identification presque assurée.

Figure 52 - Formation «tazmey» *(Aristida sspp)* près d'Azelik

2.2. LES FORMATIONS OUVERTES

Dans les cas qui précèdent, les unités végétales sont aisément identifiées comme telles parce qu'elles sont totalement couvertes, homogènes du point de vue de la végétation par conséquent même si, à l'intérieur de chaque unité apparaissent des nuances de densité et d'essences. Dans les pays du Sahel septentrional, de telles formations sont exceptionnelles.

Dans les formations *ouvertes* le fait végétal n'est plus le seul à entrer en compte dans la réflectance des unités : les sols nus y entrent aussi.

L'un des problèmes d'identification des unités végétales ouvertes tient à ce que la proportion sol nu - couverture végétale varie dans l'espace et dans le temps. Les variations dans l'espace peuvent à la rigueur être identifiées par les moyens classiques : photographies aériennes, terrain. Les variations dans le temps sont beaucoup plus malaisées à saisir : elles peuvent dépendre de facteurs saisonniers réguliers mais aussi de circonstances climatiques occasionnelles ou exceptionnelles qui ne peuvent guère être connues par les données

météorologiques des stations d'observation, trop espacées géographiquement pour fournir des indications utilisables et interpolables. Dans ce cas, on est réduit à des hypothèses, plus ou moins confirmées éventuellement par les dires des habitants. C'est ainsi que parcourant en 1980 la vallée de Sekiret (l'un des grands affluents anciens de l'Eghazer wan Agadez) aux fins d'interpréter les nuances présumées végétales de l'image Landsat de janvier 1976, nous n'avons rien pu identifier avec certitude : en 1975, d'après les nomades, il avait plu abondamment sur la vallée, ce qui avait engendré une végétation herbacée abondante et le développement des feuilles et des couronnes des ligneux ; en 1979 « il n'a pas plu », expression courante pour signifier qu'il a plu très peu, de façon non satisfaisante, ce qui a entraîné la contraction des herbacées pérennes, la rareté des herbacées annuelles, la médiocrité des frondaisons arborées en extension et en densité... Aucune comparaison n'était possible.

Il arrive aussi que l'aspect général de la végétation ne change pas pendant plusieurs années mais que changent les répartitions de détail : plaques de sable chassé par le vent, passages de bétail et de véhicules, amas de chaumes rassemblées par les tornades constituent d'une saison à l'autre des conditions variables purement locales dont vont dépendre, à terme, les espèces, leur répartition, la taille des individus, etc...

On ne peut donc être assuré, en comparant dans cette étude les données des photographies aériennes de 1955, 1975 et 1980 avec les données Landsat des années 70 que les détails de l'organisation végétale soient, chaque fois, réellement comparables.

Dans toute la partie septentrionale de l'Azawagh, les diverses formes de végétation se trouvent presque exclusivement sur les sables. On a vu que la végétation herbacée présente, en saison sèche tout au moins, des réflectances élevées, très voisines de celles des sables : il sera donc difficile de différencier les sables nus ou peu couverts d'herbe des sables plus ou moins couverts et d'identifier des niveaux de densité du couvert.

Au contraire, la végétation arborée a en toutes saisons des réflectances basses, contrastant avec le sol sableux. Les différences de densité arborée abaissant plus ou moins les réflectances des sables seront peut-être plus faciles à saisir.

La mise en évidence de ces différences de densité va dépendre de trois variables :

- la taille des couronnes ;
- la brillance des couronnes (laquelle dépend, entre autres, de la taille, de l'organisation et de la couleur des feuilles c'est-à-dire de l'essence et de l'état des ligneux) ;
- la distance entre les couronnes.

Sur les sables, il est rare que la végétation herbacée ne soit pas associée à des ligneux, même très espacés. Par contre, sur les terrains argileux, sur les formations hétérogènes ou grossières des regs et graviers des glacis, sur les pentes, la strate arborée manque généralement.

2.2.1. Les steppes sans arbres (1) discontinues

Les formations herbacées ouvertes se rencontrent partout où les conditions de rétention de l'eau par le sol sont trop médiocres pour permettre un couvert dense : ce sont les aires septentrionales, les pentes, les aires à tendance argileuse ou nettement argileuses dans certaines conditions de drainage, les aires dépourvues d'arbres pour des raisons anthropiques : auréoles de défrichement total autour des villages du sud, déboisements autour des centres d'habitat du nord.

En saison sèche, les herbes se présentent sous la forme de touffes brillantes, susceptibles de conserver une réflectance élevée. Cependant, les énormes touffes de *Panicum turgidum* (pérenne) peuvent introduire

(1) Steppe tropicale : couvert herbacé où les plantes annuelles abondent alors que les plantes vivaces sont rares et espacées. Une steppe contractée est constituée de lambeaux de tapis herbacé localisés aux substrats les plus favorables à la végétation (couloirs d'écoulement, cônes d'épandages des eaux pluviales) (Boudet et de Wispelaere, 1976).

un effet d'ombre alors que les minces tiges des *Aristida* ou de *Pennisetum mollissimum* ne font guère d'ombre sur le sol.

Depuis 1968 et la sécheresse prolongée, les recherches sur le couvert végétal ne manquent pas, effectuées pour évaluer et prévoir les masses pâturables ou pour mesurer la réalité d'une désertification. Dans ces études, les données Landsat sont utilisées avec prudence en partie justement parce que jusqu'à ces dernières années il était difficile de faire correspondre dans le temps enregistrement Landsat et observations sur le terrain. Ces études confirment que le couvert végétal n'est *marquant* sur les données Landsat qu'au delà d'un pourcentage de couverture au sol évalué à 25 ou 30 % et que « la perception du couvert herbacé est directement fonction du contraste de réflectance entre un sol nu (ou avec un couvert faible) et le même sol supportant une couverture herbacée marquante » (Boudet et de Wispelaere, 1976).

On voit donc immédiatement que les couverts discontinus d'herbacées seules sur sables sont très difficiles à identifier dans leur présence et dans leurs nuances. Le fait végétal herbacé ne semble pouvoir être réellement saisi que lorsque les formations atteignent leur plein développement et leur pleine activité c'est-à-dire pendant la saison des pluies ou à la fin de cette dernière... Malheureusement les données Landsat disponibles enregistrées à cette période ne peuvent qu'être rares en raison de la nébulosité importante ou de voiles d'humidité atmosphérique et le couvert herbacé se confond avec le couvert arboré.

Sur les pays de l'Azawagh et leurs bordures, nous possédons deux enregistrements de septembre (scènes 203-049, en bordure de notre périmètre et scène 206-049). La première concerne la partie orientale du plateau de la Tadarast dont nous savons qu'elle ne porte pas, sauf dans les vallées, de couverture ligneuse. Les réflectances des herbes sont basses dans le canal 5 et dans le canal 4 avec des nuances colorées et des variations de texture qui peuvent être interprétées comme des variations dans la densité du couvert et la nature des espèces. Toutefois, vu la saison de prise de vue, ce couvert doit plutôt être considéré comme un couvert discontinu (cf. photo de couverture).

2.2.2. Les steppes arborées, discontinues

Biogéographes et agrostologues s'accordent pour différencier les steppes en « herbeuses » et « arborées », le seuil de discrimination étant de 2 % de couvert arboré. Ce pourcentage correspond à une population de 50 unités à l'hectare à couronnes de 2 mètres de diamètre ou à 12 unités à l'hectare à couronnes de 4 mètres de diamètre ou encore à 3 unités à l'hectare à couronnes de 8 mètres de diamètre... Ce seuil est-il perceptible sur les données Landsat ? n'existe-t-il pas d'autres seuils mieux perceptibles qui permettent de définir ou simplement de percevoir des différences dans le couvert arboré ?

De façon générale, c'est dans le canal 5 que la réflectance des ligneux se marque le plus. Associées aux basses réflectances du canal 4 qui les accompagnent généralement, les formations herbacées et arborées les plus denses se remarquent par une teinte brune ou orangée sur les compositions colorées, l'accentuation vers le rouge (absorption dans le canal 5) semblant indiquer une augmentation de la population arborée et arbustive.

Dans la partie centrale et occidentale du plateau de la Tadarast, la strate arborée est présente, ni plus ni moins semble-t-il que sur les sables de la formation des *grès d'Agadez* voisine ; néanmoins, la Tadarast apparaît toujours comme beaucoup plus brillante que les sables d'Agadez sur les mêmes vues Landsat : c'est que les arbres de la Tadarast sont en notable proportion des *adaras* (qui ont donné leur nom à la région), *Commiphora africana,* qui ne porte pas de feuilles en saison sèche. Sa présence n'affecte donc guère la réflectance de la strate herbacée et des espaces dénudés, très élevée. *Commiphora africana* ne se rencontre pas exclusivement sur la Tadarast mais en est une caractéristique bien spécifique. Il semble associé à une caractéristique lithologique des *grès du Tegama* car à l'ouest d'une ligne très nette (scène 205-048 vue du 5 février 1975) qui correspond absolument au contact géologique entre *grès du Tegama*

non différenciés et *série de Farak* (CEA 1981, Greigert 1966) (1) les réflectances s'abaissent nettement dans le canal 5, signe de réapparition d'une strate arborée marquante, feuillue et relativement dense.

Dans la scène 206-049, les espaces défrichés ou dégradés, c'est-à-dire ceux dans lesquels la strate arborée est supprimée ou réduite, se marquent par une augmentation de réflectance dans le canal 5.

Le cas le plus caractéristique de variation de densité arborée dans l'espace, bien restituée sur Landsat, est celui des grandes vallées mortes de l'Azawagh et de ses affluents au nord du 16e parallèle : elles se marquent nettement sur toutes les images par une différence de réflectances, plus élevées ou plus basses, et une différence de texture des unités, avec leur voisinage : ce sont les différences de densité du piquetage arboré qui marquent les limites entre ces unités.

Les descriptions qui suivent permettent de préciser quelques exemples de steppes plus ou moins densément arborées et d'examiner comment elles se traduisent sur images Landsat.

a) *La dune d'Azelik* (feuille *Teguidda in Tessoum*), d'après photographies aériennes IRSA 1/25 000, 1979, données numériques Landsat scène 204-048 vue du 12 janvier 1976 et les observations sur le terrain (cf. figures 69 et 75).

Nous avons étudié la végétation dans les parties hautes de la dune d'Azelik, représentative par la densité et les espèces rencontrées des aires sableuses à couvert discontinu herbacé et arboré à la même latitude.

La dune est recouverte d'une végétation relativement dense de *Panicum turgidum,* herbacée pérenne dont les touffes mesurent de 50 cm à 2 mètres de diamètre, espacées de façon variable (de deux à trois mètres jusqu'à 50 mètres), d'*Acacia ehrenbergiana* et *Maerua crassifolia* (2) sous leur forme arbustive (un à deux mètres de hauteur) et sous leur forme arborée (quatre à cinq mètres).

Figure 53 - Formation végétale ouverte et homogène, caractéristique des sables de la formation d'Agadez *(grès d'Agadez)*, ici sur la dune d'Azelik : au premier plan, touffes de *Panicum turgidum (afazo)* ; au second plan, *Acacia ehrenbergiana (tamat).*

(1) Les *grès du Tegama,* compacts et durs dans leur partie supérieure, sont recouverts de 6 mètres environ de sables quaternaires. La *série de Farak* est formée dans sa partie supérieure de grès très fins et d'argiles gréseuses (Greigert, 1966).

(2) *Acacia ehrenbergiana* a la forme d'un cône posé sur la pointe, avec des frondaisons larges mais ténues ; *Maerua crasifolia* est très brouté et souvent réduit au tronc et à quelques feuilles.

Un examen attentif des photographies aériennes montre que si la strate herbacée est répartie à peu près uniformément sur toute l'aire sableuse, la strate ligneuse se rassemble selon les axes d'écoulement de l'eau, soulignant des talwegs imperceptibles :

Figure 54 - Azelik, d'après photographie aérienne IRSA, 1979 1/25 000, 1 cm = 250 mètres.

Sur les aires moyennement denses, on compte de 13 à 15 individus à l'hectare pour des couronnes de moins de 4 mètres de diamètre : on se trouve donc au dessous du seuil de 2 % de couverture cité plus haut.

La vue du 28 juin 1975 en composition colorée à 1/500 000 ne paraît pas significative car le canal 5 y est nettement absorbant sur la majorité de l'image, y compris sur des aires connues comme dépourvues d'arbres : l'humidité atmosphérique a favorisé un recru herbacé et l'activité chlorophyllienne. Il en est de même pour la vue du 11 avril 1976.

La vue du 5 février 1975 de la scène 205-048 (composition colorée à 1/500 000, cf. figure 76, hors texte) présente sur le fond clair de la dune quelques taches plus accentuées dans le canal 5 : signe de présence arborée dans les conditions particulièrement favorables de cette année là dans la région, attestée par les traces d'écoulement de l'Eghazer au delà de son habituel « delta terminal » ; les couronnes arborées et arbustives peuvent être plus sombres et plus épaisses, donc plus marquantes, même si elles ne sont ni plus larges ni plus nombreuses...

Les données du 12 janvier 1976, scène 204-048 traitées numériquement de façon très simple (dégradation des niveaux canal par canal) font apparaître des taches de valeur plus élevée que celle des sables (au dessus du niveau radiométrique 65 dans le canal 6) qui correspondent ailleurs à une végétation herbacée dense de type *tazmey* et suivent en effet les talwegs ; elles font également apparaître des taches de valeur plus basse que celle des sables (48 à 57 sur le canal 6) qui représentent plutôt les plaques de cailloutis juxtaposées aux sables. Aucune de ces taches, dans leur valeur ni dans leur disposition, ne paraît correspondre à des surfaces arborées...

Dans le canal 5, on retrouve les taches du niveau « cailloutis ou argiles » environnant les sables (niveau 54 à 46) qui correspondent ici aussi aux cailloutis ; on trouve des taches de réflectance plus élevée que les sables, rares, disposées dans les talwegs et dans l'axe des talwegs visibles (niveau supérieur à 62). Ces taches peuvent correspondre aux espaces absolument dénudés (par les écoulements) ou à des espaces couverts d'herbacées annuelles très brillantes.

C'est donc la réflectance de la dune toute entière qui prendrait en compte la couverture végétale, herbacées et ligneux, sans distinction de disposition ou de densité.

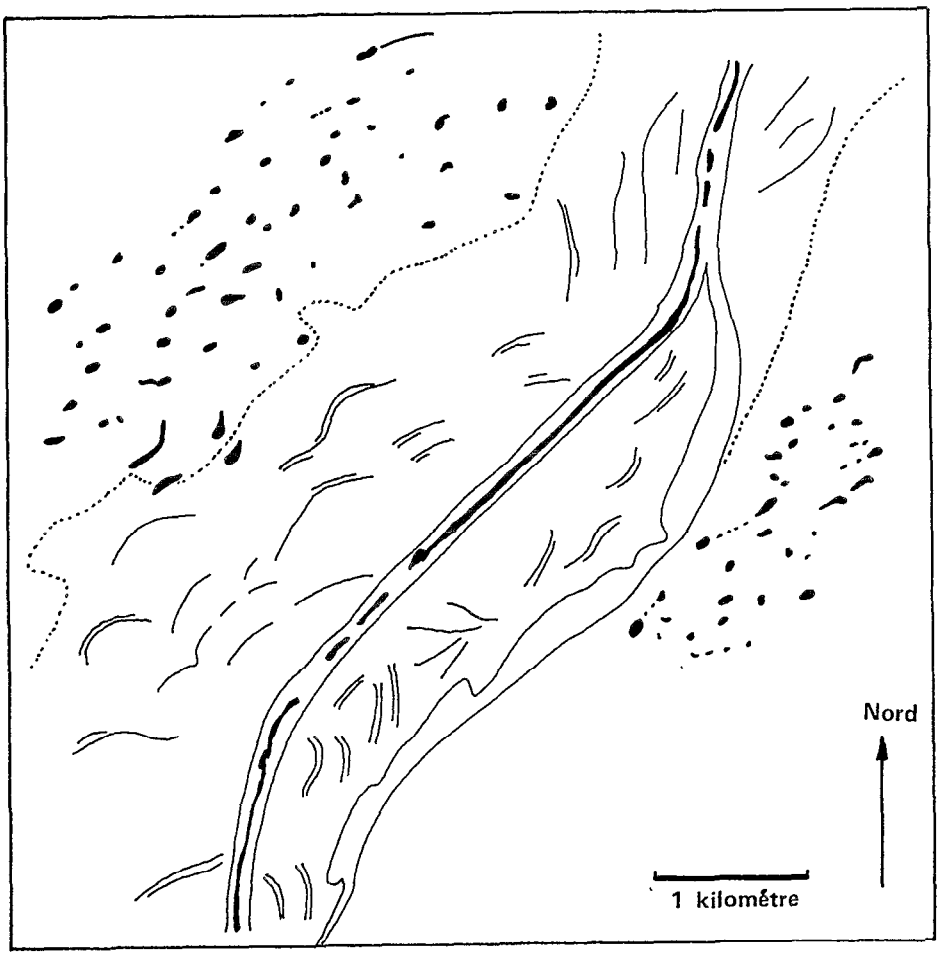


Figure 55 - In Kutayan, croquis d'après photographies aériennes AOF 55-56 NE 31-V, 191

b) *La vallée de l'Azar et sa bordure à In Kutayan* (feuille *Tillia*), d'après photographies aériennes AOF 55-56 31-V 190, 191 et 192, 1/50 000 et les vues Landsat du 19 février 1976 et du 30 septembre 1978, scène 206-049, compositions colorées à 1/500 000 (cf. figure 77, hors texte).

La vallée morte de l'Azar, affluent de rive gauche de l'Azawagh, traverse un champ de dunes en suivant leur orientation générale.

Sur la rive droite et sur la rive gauche de l'Azar on remarque une succession de dunes et de bas-fonds de petite taille sans orientation très distincte quoique présentant des alignements. Les bas-fonds sont occupés par une végétation dense, difficile à mesurer en raison de la petite taille des unités. Les dunes sont colonisées par une végétation herbacée et ligneuse, cette dernière très espacée - - un individu tous les 50 mètres environ.

La vallée de l'Azar présente une structure très différente : pas de bas-fonds à végétation dense mais les mêmes sables que les dunes précédentes, remaniés en crêtes et bourrelets vermiculés d'aspect plutôt fluviatile qu'éolien (traces de réseau anastomosé ?). Seule la stéréoscopie permet de discerner ces reliefs. L'ensemble est couvert de façon homogène par une végétation herbacée et arborée en piquetage de un arbre ou arbuste par 25 mètres environ. Un alignement plus serré marque un axe d'écoulement présumé fonctionnel (?).

Entre les sables des rives et les sables de la vallée, la différence réside dans la densité arborée. L'image Landsat restitue cette différence par une intensité d'absorption nettement plus grande dans le canal 5 pour la vallée de l'Azar. La réflectance des éléments « bas-fond » des secteurs dunaires des deux rives et la réflectance de la vallée paraîssent semblables.

Il est remarquable que ce qui vient d'être décrit de la différence entre rives et vallée soit nettement plus distinct sur la vue de saison sèche (19 février 1976) que sur la vue de fin de saison des pluies : sur cette dernière, des aires de forte absorption dans les canaux 4 et 5 tendent à masquer la différence entre les deux unités ; la densité et l'activité végétales de cette période uniformisent les réflectances.

Chaque élément composant les formations que nous venons de décrire, « ligneux », « herbacées », « sol nu », s'associe aux autres pour former des unités composites mais homogènes au niveau de la tache élémentaire ou du groupe de taches élémentaires et l'ensemble constitue des paysages uniformes. Ces paysages se rencontrent sur les aires sableuses non organisées comme la formation des *grès d'Agadez* du bassin de l'Eghazer wan Agadez ou certaines parties du plateau de la Tadarast.

Sur les vastes aires ensablées du centre de l'Azawagh ou sur les plateaux du Continental terminal des régions méridionales, on rencontre des formations végétales hétérogènes à deux ou trois composantes, offrant des paysages végétaux contrastés et régulièrement répétitifs. Ces *éléments de texture* couvrent chacun des surfaces variables, plus ou moins perceptibles au niveau de la tache élémentaire Landsat.

2.3. LES FORMATIONS HETEROGENES REPETITIVES

Nous aborderons ici deux systèmes différents, très largement représentés l'un et l'autre : d'une part les systèmes « dunes - bas-fonds » réticulés des ergs fixés, d'autre part les systèmes « brousse tigrée ».

Pour qu'un système végétal du type «dunes-bas-fonds» se constitue, il faut une quantité minimale de pluie susceptible d'entretenir une végétation dense ou relativement dense où les conditions sont favorables; on a alors des paysages contrastés dans lesquels les reliefs sont peu couverts d'une végétation discontinue, herbacée principalement et où les parties basses sont couvertes — en totalité ou en partie — d'une végétation dense, arborée et arbustive.

La brousse tigrée (1) se caractérise par une disposition inverse de la précédente par rapport au relief, sous des pluviométries supérieures : les aires couvertes sont en position haute et les aires dénudées plutôt en

(1) qui tire son nom de la structure caractéristique sur photographies aériennes, traduite sur les cartes topographiques de l'IGN par un poncif particulier.

position basse mais ceci n'est pas systématique et les reliefs sont de si faible amplitude — quand ils existent — que les nuances sont nombreuses. La qualification schématique « brousse tigrée » recouvre en fait des différences notables et l'on verra que des organisations semblables se rencontrent en transition de latitude entre les aires à ergs réticulés et les aires à brousse tigrée proprement dite.

2.3.1. Les systèmes réticulés dunes - bas-fonds

Ces systèmes ont été engendrés au cours de la succession des épisodes secs et des épisodes humides du Quaternaire moyen et récent. A une période aride, pendant laquelle les sables se mobilisent en édifices organisés succède un épisode humide qui entraîne la formation de sols (au sens proprement pédologique), l'écoulement des anciens cours d'eau, la formation de nouveaux réseaux de lacs, mares, cours d'eau s'insinuant entre les dunes et favorisant le dépôt d'éléments fins. Au cours d'épisodes ultérieurs de sécheresse puis d'humidité, l'ensemble peut être remanié plusieurs fois.

Actuellement, les aires à formations réticulées subissent un climat à tendance sèche, certainement plus humide que celui qui a vu naître les ergs et plus sec que celui qui a vu se constituer les bas-fonds argileux et les remaniements fluviaux. Les dunes sont fixées et recouvertes d'herbes en couverture discontinue au nord, quasi continue aux abords du 15e ou du 14e parallèle, souvent occupées par des arbres et des arbustes. Elles portent sur leurs flancs des traces d'érosion linéaire visibles sur photographies aériennes. Selon la pluviométrie, ces « barrancos » sont occupés par la végétation (au nord) ou au contraire dénudés par rapport aux secteurs non ravinés (dans le sud).

Les bas-fonds sont couverts en totalité ou en partie de formations végétales denses, fermées, où les couronnes arborées et arbustives jointives dominent. La disposition de ce couvert semble dépendre plus ou moins directement, ici aussi, de la disponibilité en eau : une pluviométrie relativement élevée favorise l'inondation prolongée des bas-fonds, qui sont dénudés en saison sèche ; la végétation s'y organise en auréoles sur les secteurs les plus élevés ou sur la rupture de pente avec la dune ; une pluviométrie moindre laisse les bas-fonds « secs » ou inondés pendant une période courte, la végétation ne pâtit pas du manque d'oxygène et occupe toute la surface disponible.

On pourra s'étonner que les surfaces argileuses et argilo-sableuses du bassin de l'Eghazer soient dépourvues de végétation alors que les dépressions interdunaires des régions proches, tout autant argileuses et argilo-sableuses, soient occupées par une végétation importante. C'est que les secteurs argileux du bassin de l'Eghazer, ouverts sur l'extérieur et drainés par un réseau hydrographique encore fonctionnel ne conservent pas l'eau alors que les bas-fonds sont dépourvus d'émissaires et profitent d'une alimentation en eau différée par l'infiltration dans les dunes : les ressources en eau y sont plus abondantes et l'apport est mieux réparti dans le temps.

La faible densité arborée sur les dunes — qui est en relative contradiction avec les observations citées précédemment faisant état de couverts notables sur tous les sables — peut être mise en relation avec la *pente*, qui favorise l'écoulement et empêche la constitution de réserves à portée des racines.

Cette faible densité arborée et la présence de la végétation herbacée rend les dunes très brillantes ; inversement, les argiles des bas-fonds et la dense végétation arborée qui les occupe rend ces derniers particulièrement sombres. Le contraste de réflectance est donc très élevé, d'autant plus que la rupture de pente est une ligne très nette. Sur les photographies aériennes, la structure dunes - bas-fonds est presque toujours très bien marquée ; sur les cartes topographiques, cette structure est souvent simplifiée pour les besoins de la généralisation ; sur les données photographiques Landsat elle est visible de façon variable selon la taille des éléments, leur réflectance et les nuances qui interviennent dans leur organisation relative.

Les exemples qui suivent ont été choisis parce qu'ils ont paru significatifs de la variété des arrangements et de leur restitution sur les images Landsat.

a) *Le secteur de Tin Jekoda* (feuille *Tillia*), d'après les photographies aériennes AOF 55-56 NE 31-V, 194, 195 au 1/50 000 et les vues du 19 février 1976 et 30 septembre 1978, scène 206-049 (cf. figure 77, hors texte).

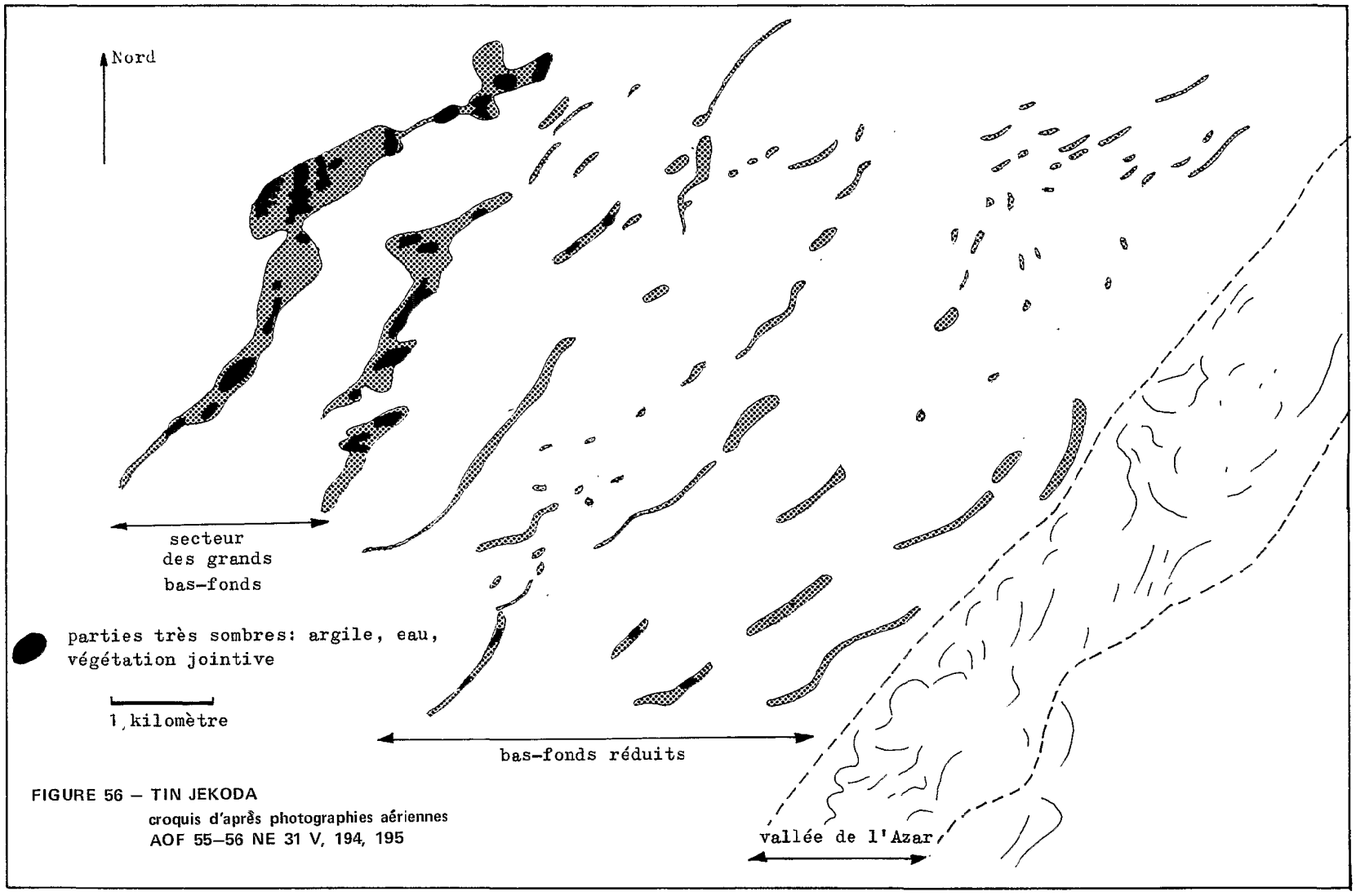


FIGURE 56 – TIN JEKODA
croquis d'après photographies aériennes
AOF 55–56 NE 31 V, 194, 195

Figure 56 - Tin Jekoda, croquis d'après photographies aériennes AOF 55-56 NE 31-V, 194, 195

Sur les photographies aériennes, la zone se structure en trois secteurs : au nord-ouest, un secteur à larges bas-fonds peu contrastés par rapport au sable des dunes mais qui présentent des aires discontinues nettement plus sombres ; au centre, des bas-fonds de largeur réduite, peu contrastés ; au sud-est, un secteur très différent à texture contournée et dont les éléments sont orientés différemment des précédents, qui correspond à la vallée de l'Azar (ici aussi parallèle à l'orientation dunaire générale).

L'ensemble est couvert d'un piquetage arboré visible, d'un espacement de 50 mètres environ. Dans la vallée de l'Azar, ce piquetage est plus dense (intervalles d'une trentaine de mètres) disposé par endroits en linéarités vermiculées où la densité est encore plus élevée.

Sur l'image Landsat le contraste entre le second et le troisième secteur est bien visible : une texture ondulée est bien perceptible au nord-ouest, la vallée offre en revanche une texture uniforme, une réflectance plus basse dans le canal 5.

La région dunaire quant à elle, se présente différemment sur les deux vues étudiées. La représentation la plus précise et la plus proche des photographies aériennes est celle du 30 septembre 1978. Dans le secteur 1, l'extension des bas-fonds et même les aires plus sombres sont distinctes. Le secteur 2 est figuré par des linéarités étroites, bien conformes à l'aspect de la photographie aérienne. La réflectance des bas-fonds semble être mise en évidence par des valeurs plus basses dans le canal 5 (signe de végétation arborée et/ou d'activité chlorophyllienne). La texture « ondée » est soulignée d'une part par ces réflectances plus basses dans le canal 5, d'autre part par des réflectances plus hautes dans le canal 4 qui peuvent être dues à un phénomène d'ombre propre dû à la direction des rayons solaires par rapport aux pentes et à la direction générale de l'erg. Ce phénomène d'ombre, mis en évidence ici par des conditions d'orientation particulièrement favorables, rend la texture dunes - bas-fonds encore plus nette.

L'organisation structurée en dunes et bas-fonds sub-parallèles et orientés de ce secteur a été plus particulièrement étudiée, dans le cadre d'une recherche méthodologique, sur une image numérique Landsat, vue du 30 septembre 1978. Des échantillons d'image ont été traités par des procédures de filtrages (Sobel, Gabarit, Transformée de Fourier). Les résultats (Méring, Poncet, Rakoto-Ravalontsalama, 1985) mettent en évidence des détails de la structure passés inaperçus sur image brute et surtout, ils ont permis des mesures de paramètres descriptifs (orientation, régularité, rythme) de la structure dunaire ; ces mesures rendent possibles des comparaisons précises entre formations dunaires différentes et entre nuances dans les mêmes formations.

b) *La zone « T3 »* (feuille *Takanamat,* à l'est du kori Erari), d'après photographies aériennes 75 NIG 40/600 (1975, 1/60 000) 5264, 5265 et 5266 et les vues Landsat du 19 février 1976 et du 30 septembre 1978, scène 206-049 en composition colorée à 1/500 000.

Les photographies aériennes mettent en évidence une structure dunes -- bas-fonds dans laquelle chacun de ces éléments présente deux composantes végétales différentes :

— les bas-fonds sont vastes, à végétation régulièrement répartie sous forme d'un piquetage arboré espacé de 50 mètres environ ; par endroit ces bas-fonds présentent des aires d'extension limitée dans lesquelles la densité des ligneux est nettement plus élevée, avec des couronnes jointives ou quasi-jointives;

— les dunes sont irrégulièrement disposées, plus ou moins allongées, d'orientation générale distincte mais non absolument nette, faiblement contrastées par rapport aux bas-fonds ; elles sont vastes : deux kilomètres de longueur et 600 ou 800 mètres de largeur en moyenne, séparées par des intervalles très variables ; les sommets sont un peu plus foncés que les pentes : la définition de la photographie aérienne ne permet pas d'interpréter le phénomène avec certitude mais il est probable que les flancs des dunes sont cannelés de rigoles dénudées alors que les parties hautes sont couvertes d'une végétation herbacée, peut-être discontinue mais régulière (vraisemblablement de grosses touffes de *Panicum turgidum*).

Sur l'image Landsat du 19 février (saison sèche) la zone présente une texture peu contrastée, à orientation générale mal visible. Elle est peu distincte, en raison du faible contraste de réflexion entre chaque élément, l'irrégularité des dispositions relatives, la faible extension des éléments les plus brillants (les pentes) et les plus sombres (les bas-fonds à végétation dense).

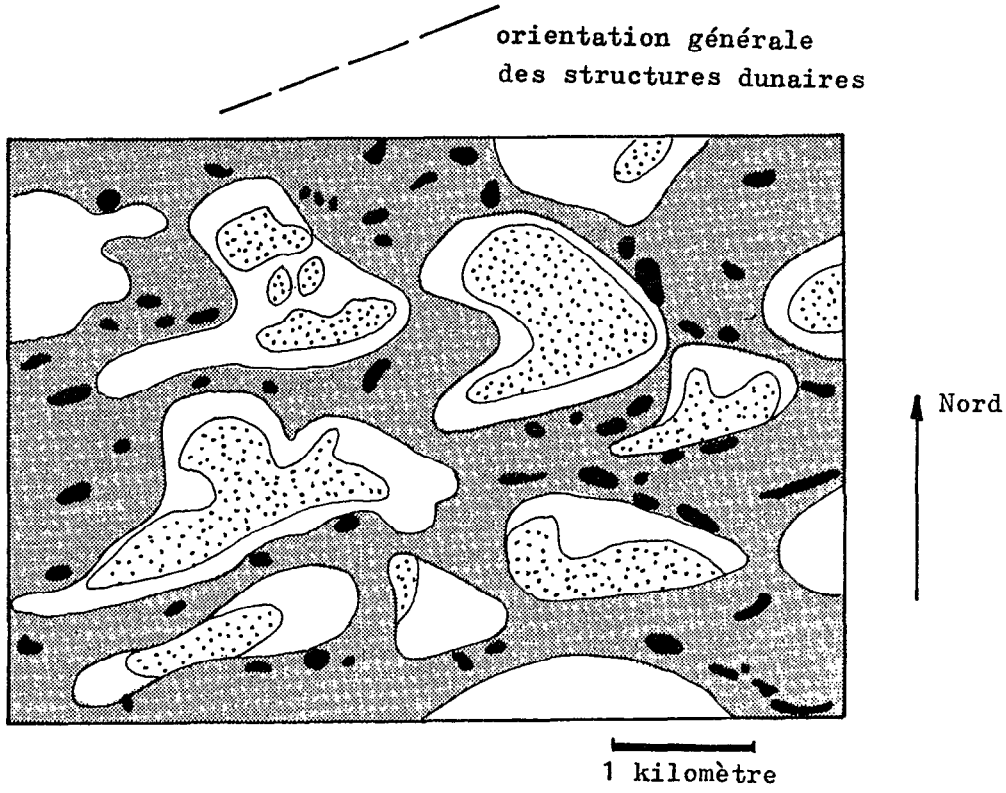


Figure 57 - Secteur « T_3 », croquis d'après photographies aériennes 75 NIG 40/600, 5265

Sur l'image Landsat du 30 septembre (saison des pluies) apparaît plus nettement un pointillé rouge sombre qui atteste de l'activité et de la densité végétales des bas-fonds ; quelques points bleus très ténus montrent que certains des bas-fonds sont inondés : réflectance caractéristique de l'eau libre, basse dans le canal 7, très élevée dans les autres canaux ; aucune orientation visible.

2.3.2. Les systèmes du type « brousse tigrée »

La « brousse tigrée » est une formation végétale des plateaux cuirassés du Continental terminal — donc de la zone méridionale de notre étude — caractérisée par l'alternance régulière de bandes de fourrés denses à combrétacées et de bandes de sol absolument nu. Les territoires à brousse tigrée sont incultivables mais très exploités pour le bois de feu et comme pâturage permanent pour les animaux (vaches laitières, chèvres et moutons) qui stationnent toute l'année dans les villages. L'ensemble offre sur le terrain une structure caractéristique ondulée en bandes de taille relativement uniforme. Les surfaces relatives entre aires couvertes et aires dénudées peuvent varier donnant des brousses tigrées plus « ouvertes » que d'autres.

La brousse tigrée est considérée comme une formation végétale fortement dégradée (1) ; l'équilibre d'origine serait représenté par la forêt à combrétacées que l'on rencontre actuellement par endroits au sud de Dosso et dans la région de Gaya. La dégradation est imputée à l'action du bétail, favorisée par des conditions climatiques et pédologiques médiocres : le piétinement et le vent entraîneraient la formation d'ondes successives d'accumulations meubles et de tassements du sol, empêchant l'extension des racines et favorisant la dénudation. Il se peut que les termites jouent un rôle dans l'ensemble. A vrai dire, ceux qui se sont penchés sur la brousse tigrée avouent leur perplexité et la nécessité d'études plus poussées fondées sur des travaux systématiques.

L'étude des échantillons de photographies aériennes montre que certaines formations, qualifiées à première vue de « brousses tigrées » (et notées comme telles sur les cartes topographiques) présentent des caractéristiques différentes. Les exemples qui suivent tentent de présenter les plus typiques de ces nuances, sur photographies aériennes et sur images Landsat.

a) *Une brousse tigrée de type classique : le plateau de Kiota* (feuille *Niamey*), d'après les photographies aériennes 73 NIG 020/200 (1973, 1/20 000) 185, 186 et 187 et la vue Landsat du 26 mars 1976, scène 206-051 (voir figure 80, hors texte).

La brousse tigrée se développe sur les lambeaux de plateaux qui dominent d'une cinquantaine de mètres le Dallol Boso sous la latitude de 13°20'. Il s'agit de la partie non cultivée d'un terroir densément occupé où la pression agricole et la pression pastorale sont très fortes.

Les bandes végétales mesurent environ 40 mètres de largeur dans leur section la plus large, contre 60 ou 80 mètres pour les bandes dénudées. Le contraste est très élevé car les combrétacées ont un aspect foncé, épais, dense avec de nombreux individus sans feuilles ; les feuilles mortes sont accumulées à leur pied. Les bandes nues, très claires, au sol presque blanc, présentent sans solution de continuité des brillances accentuées.

L'ensemble est encadré par la frange de forte absorption qui cerne le plateau : bordure sommitale dépouvue de végétation et de sol pédologique, recouverte de blocs vernis noirs, éboulis de la cuirasse de teinte noire ou rouge foncé. Sur l'image Landsat cette bordure est caractérisée, comme nous l'avons vu, par une très forte absorption dans tous les canaux notamment dans le canal 7.

La brousse tigrée n'est pas perceptible sous forme de texture sur les compositions colorées Landsat à 1/500 000 de la région de Kiota : les surfaces concernées présentent au contraire une homogénéité remarquable, avec une absorption assez nette dans le canal 7, notable dans les canaux 4 et 5.

---

(1) Clos-Arceduc, 1956 ; White, 1970 ; Boudet, 1972 ; Gallais, 1975 ; Ambouta 1984.

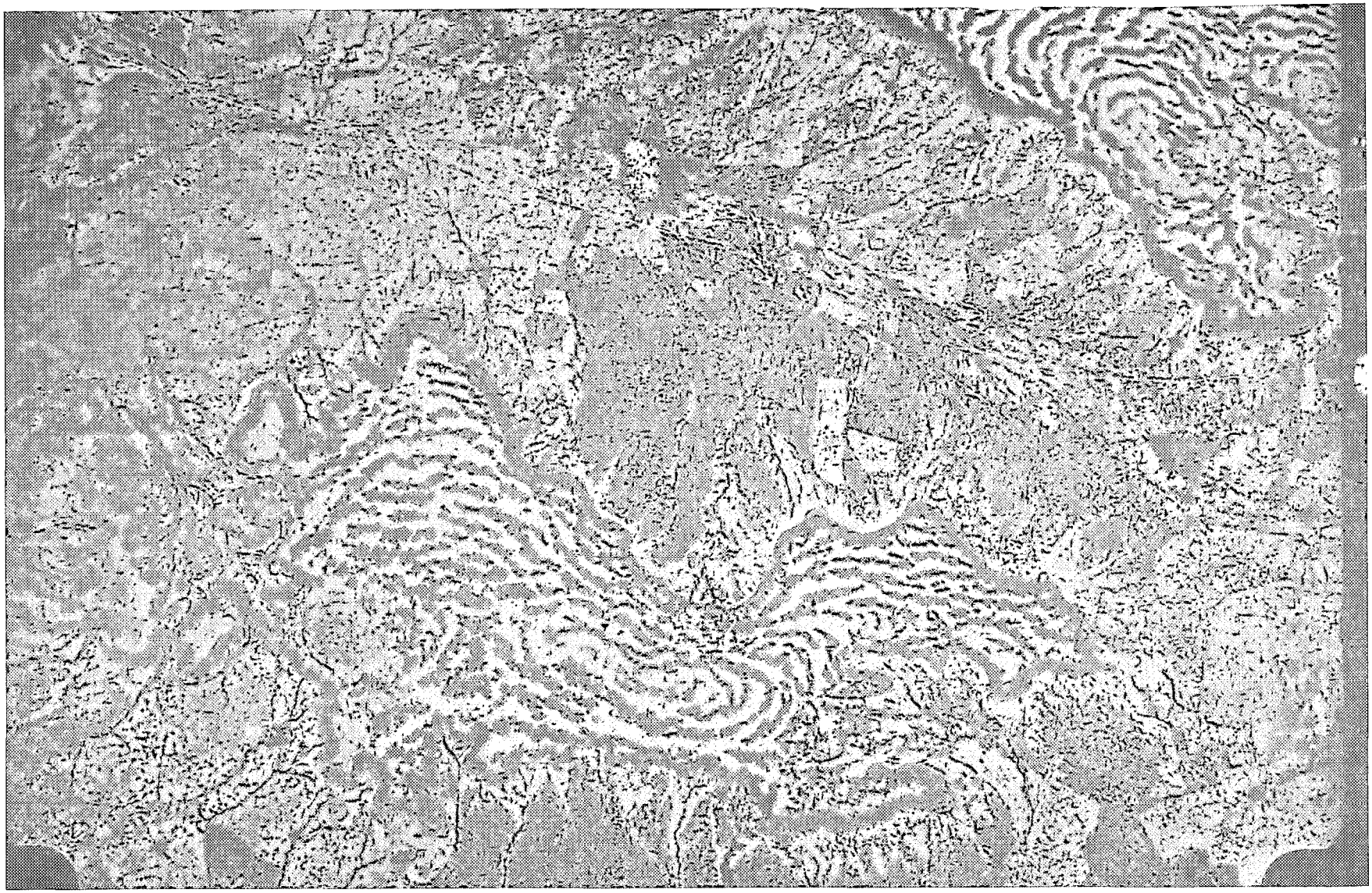


Figure 58 - Brousse tigrée sur plateaux à Kiota, photographie aérienne IGN 1/20 000, 1973.

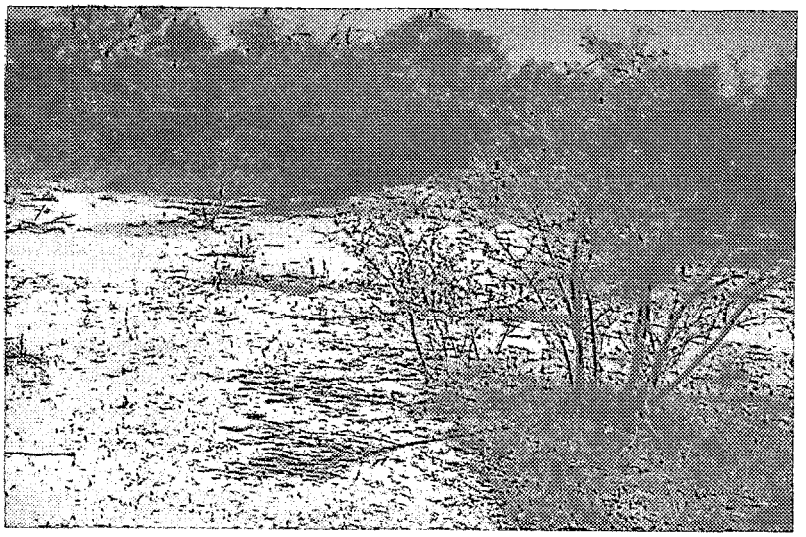


Figure 59 - Brousse tigrée près du village de Farey (arrondissement de Dosso) : au premier plan, le sol nu argilo-sableux à tendance kaolinique. On remarque sous les buissons les amoncellements de feuilles mortes et de brindilles qui contribuent au contraste de brillance entre bandes couvertes et bandes dénudées.

Mais sur la même vue Landsat, un peu au nord-est (sous la latitude 13°50') dans la région de Matankari, un lambeau de plateau situé sur la rive gauche du Dallol Mawri présente sur composition colorée Landsat une texture ponctiforme dont le fond est le même que ce qui vient d'être décrit mais dont le pointillé apparaît en rouge, donc très absorbant dans le canal 5 : on a là une brousse tigrée plus ouverte et moins régulière, où les bandes de végétation laissent entre elles de vastes surfaces nues de sol stérile. Par endroits, des cercles sombres cernent des *trous* dans la cuirasse, des « dolines » (1) bordées d'escarpements et dont le fond plat est cultivé : ce sont ces cercles qui rendent la texture visible et originale sur Landsat.

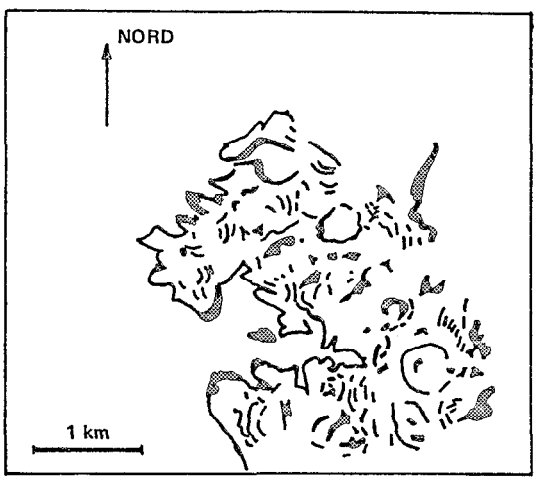


Figure 60 - Matankari, croquis d'après photographies aériennes
75 NIG 40/600 4773

(1) Nous empruntons ici son vocabulaire au monde karstique... Il n'est pas exclu que ces dépressions circulaires fermées soient dues à un phénomène assimilable – au moins dans ses effets – à une dissolution, tant les faciès sont voisins.

Nous ne possédions pas d'enregistrements Landsat sous forme numérique sur la région des Dallols permettant d'aborder, dans notre aire d'étude, la restitution du phénomène « brousse tigrée » sur image numérique. Pour l'approcher de plus près, nous avons examiné les données numériques Landsat de la scène 208-050, vue du 5/11/1975 (région située au nord de Tillaberi) et les données de simulation Spot, enregistrées en 1980 sur la ville de Niamey et son voisinage immédiat. La structure alternée et ondulée de la brousse tigrée n'apparaît pas du tout sur les images Landsat brutes (sans traitements de contours ni renforcements de contrastes) ; par contre elle apparaît avec beaucoup de netteté sur les données brutes de la simulation Spot, grâce à leur meilleure résolution.

b) *Les secteurs de Dinkildimi* (feuille *Filingué*), d'après les photographies aériennes 75 NIG 40/600 (1975, 1/60 000) 3321 à 3336 et la vue Landsat du 26 mars 1976, scène 206-050 (cf. figure 78, hors texte)

La région qui entoure le village de Dinkildimi se trouve entre le Dallol Boso et le Dallol Mawri dans une aire du Continental terminal située au nord des plateaux cuirassés et partiellement ensablée. Toute la région est densément peuplée d'éleveurs et de cultivateurs.

On a choisi de détailler particulièrement ce secteur car il révèle, dès l'examen superficiel des données Landsat en composition colorée, une complexité certaine, des textures variées et la juxtaposition de deux ensembles dont l'un paraît être la trace d'un erg ancien, encore très reconnaissable.

Le premier ensemble est une unité à texture très fine, vermiculée et vésiculaire en rouge sombre et brun (canaux 5 et 4 absorbants) sur fond clair dans laquelle le canal 7 se marque par une nette absorption.

Le second est une unité allongée est-ouest, à texture indifférenciée et aux contours flous, dans laquelle les canaux 4 et 5 présentent des réflectances moyennes à élevées et le canal 7 n'apparaît pas ou peu.

Sur les photographies aériennes, les secteurs vésiculaires, qui correspondent à une végétation dense, arbustive et/ou arborée, se trouvent en très léger relief par rapport aux secteurs clairs de la même unité ; ils occupent même tous les reliefs. La seconde unité correspond à une dune couverte de végétation herbacée et de parcelles cultivées. La coupe suivante donne une idée de l'organisation générale des deux ensembles :

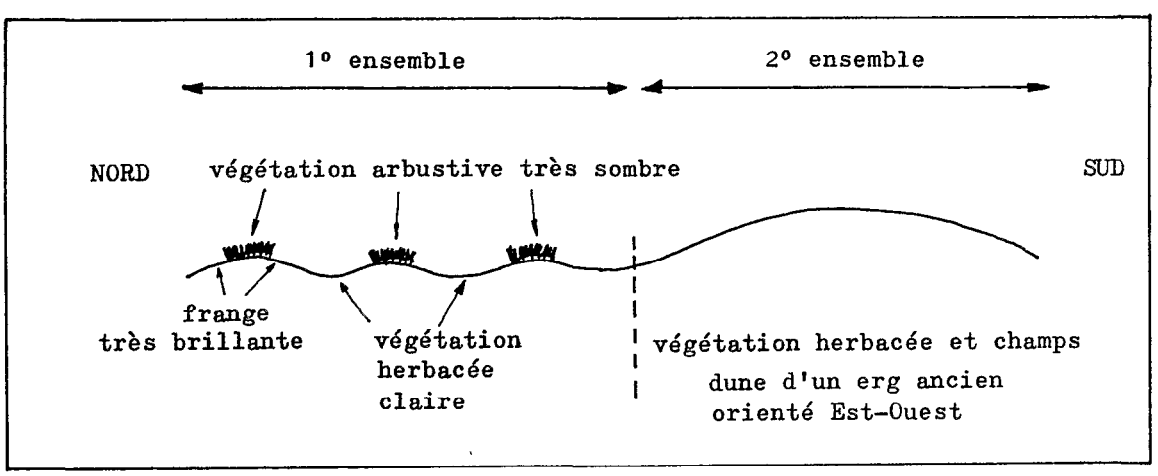


Figure 61 - Secteur de Dinkildimi, coupe

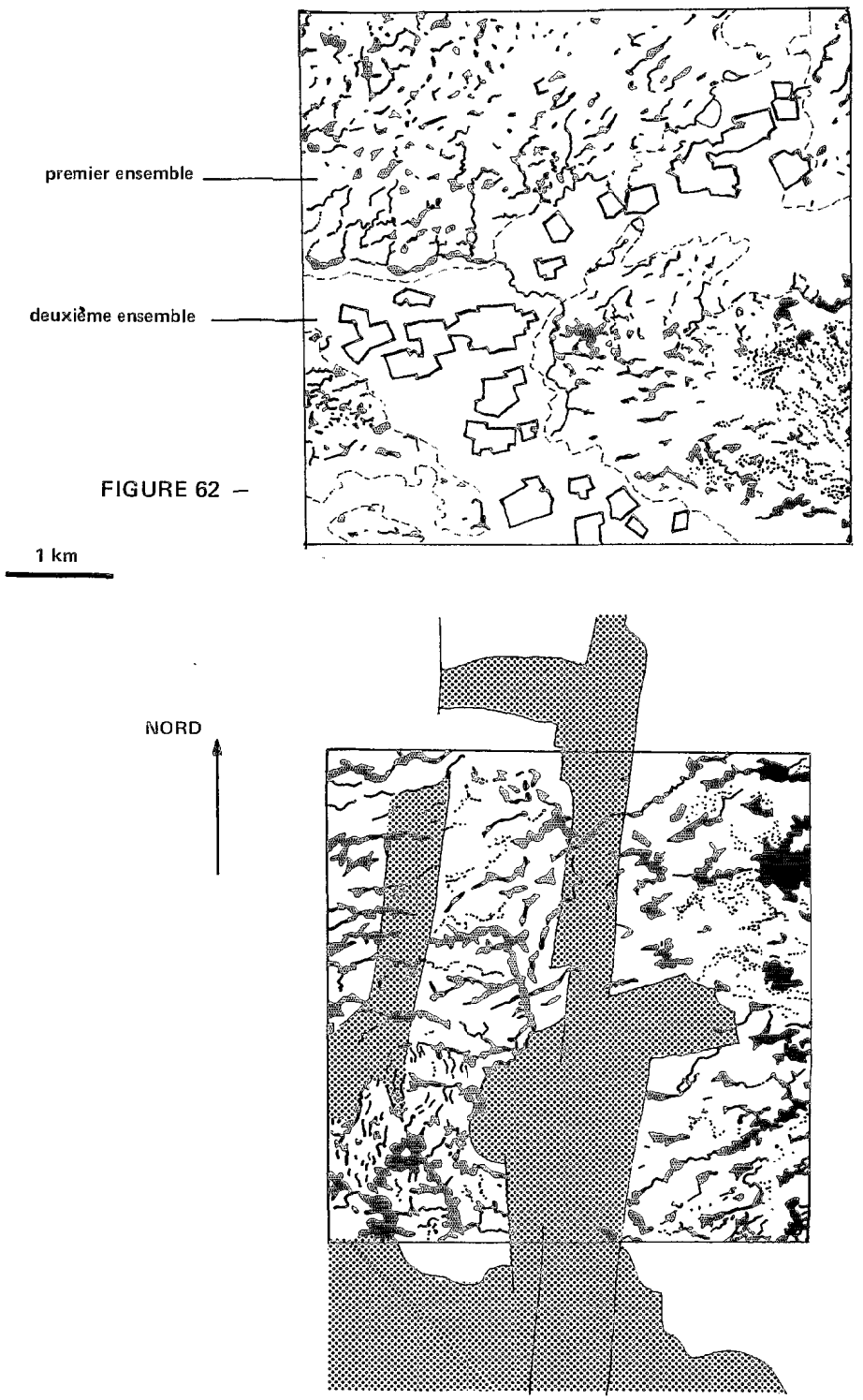


Figure 63 - Dinkildimi, croquis d'après photographies aériennes 75 NIG 40/600, 3321, 3336

La texture du premier ensemble apparaît comme beaucoup moins régulière que celle de la brousse tigrée bien que des amorces d'orientation apparaissent par endroits. On notera que le premier ensemble présente, en sus des formations denses sur les micro-reliefs, des formations de fond de vallée, linéaires (l'une recoupe le secteur dunaire sur l'interprétation de photographie aérienne, figure 62).

Les éléments de végétation dense des micro-reliefs sont encadrés sur la photographie aérienne par des bordures claires très brillantes, qui accentuent le contraste avec le voisinage, ce qui peut contribuer à les rendre bien visibles sur les données Landsat. Faute d'étude de terrain, nous ne pouvons que proposer une explication pour cette bordure très réfléchissante : elle serait causée par le piétinement du bétail autour des fourrés, piétinement qui détruit les herbacées environnantes et fait apparaître le sol *karal* bien connu des éleveurs peuls de la région. *Karal* se forme sur les aires lourdement fréquentées par les troupeaux dans les zones à brousse tigrée. Il est de couleur blanche et absolument stérile.

De part et d'autre du secteur illustré par la figure 62 les aires à végétation dense s'agrandissent par endroits et présentent des orientations linéaires dont un exemple est visible dans le coin sud-est.

La figure 63 présente, au nord-ouest du précédent, un secteur très semblable mais où la surface des aires denses arborées et arbustives est nettement plus importante. Ici aussi, et peut-être plus nettement que sur le secteur précédent, la végétation dense paraît s'être fixée sur les micro-reliefs.

La photographie aérienne fait apparaître des linéaments rectilignes de direction nord-sud, peu distincts en eux-mêmes mais qui délimitent une aire sans texture visible. Cette aire peut être identifiée sur image Landsat par une absorption plus nette dans le canal 5 que dans le canal 7 ce qui l'assimile plutôt aux aires dunaires (deuxième ensemble de la figure 62) mais il faut noter que la rectilinéarité des limites n'est pas visible sur Landsat.

Les formations végétales denses et sombres de la région de Dinkildimi seraient donc une variante de la brousse tigrée, une forme encore plus dégradée que celle-ci peut-être, sous l'influence des mêmes facteurs, mais exacerbés : climat à tendance de plus en plus sèche, forte fréquentation animale ; elles pourraient également être une variante de la brousse tigrée sur les plateaux faiblement ensablés... Il va sans dire que seule une étude attentive sur le terrain permettrait d'obtenir les informations susceptibles de formuler une interprétation valable (1).

Des exemples qui ont été cités ci-dessus et de l'observation des textures à caractères végétal dans tous les pays de l'Azawagh sur photographies aériennes et telles qu'elles sont restituées sur les images Landsat en composition colorée, il ressort que les données Landsat restituent non pas les *formes* des unités composantes mais un ensemble différent, à condition que soient franchis des seuils de prise en compte qui concernent :

— le contraste de réflectance entre les différentes composantes, qui peut se traduire en intensité de réflectance ou en longueur d'onde dominante ;
— la taille des unités.

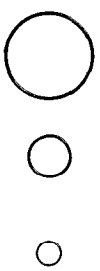
Les deux facteurs se combinent pour donner la *texture* des unités géographiques : des textures très ténues sont perceptibles si le contraste est élevé ; des textures peu contrastées sont perceptibles si les unités sont vastes...

Le tableau page suivante résume et schématise les modes de figuration des formations végétales d'après l'intensité de réflectance et le canal discriminant.

(1) cf. p. 182 à propos de la dégradation de la brousse tigrée près de Niamey.

Intensité de réflectance :

Intensité de discriminance par rapport aux autres canaux :



Thèmes	canal 4	canal 5	canal 7
Sables nus	○	○	○
Sables très peu couverts	⊘	⊘	○
Herbacées seules discontinues (saison sèche)	◔	✳	○
Herbacées et arborées discontinues	⊘	✳	○
Arborées et arbustives denses (saison sèche)	✳	◔	⊘
Herbacées denses (saison des pluies)	◔	◔	○
Herbacées denses *tazmey* (saison sèche)	○	○	○
Arborées denses (saison des pluies)	○	●	○

2.4. L'EVOLUTION DE LA VEGETATION

La végétation est un ensemble dynamique dont l'évolution est saisonnière (la succession des états de saison sèche et des états de saison des pluies) et interannuelle selon que les périodes climatiques sont à tendance sèche ou à tendance humide.

Le rythme saisonnier se marque par deux phases contrastées : en raison des pluies, une activité chlorophyllienne générale, la couverture intégrale du sol sauf sur les roches nues et les regs et l'apparition d'espèces spécifiques sur certains milieux précis ; en saison sèche, la disparition d'une partie du couvert végétal et la diminution ou la disparition de l'activité chlorophyllienne en chaumes, pailles et chute des feuilles.

La succession des phases sèches et des phases humides se marque par des événements beaucoup moins bien connus dans le détail. De façon générale, le dessèchement entraîne l'appauvrissement du couvert végétal, touchant particulièrement la strate des arborés et arbustifs et, en cas de paroxysme, celle des herbacées annuelles ; l'action des hommes et des troupeaux se fait alors plus visible et plus grave puisque les uns et les autres exploitent ou consomment les espèces qui, sans cela, auraient survécu.

Or, les données Landsat sur les pays de l'Azawagh sont enregistrées sans continuité et elles correspondent à des dates trop hétéroclites pour qu'il soit possible d'effectuer une étude véritablement multitemporelle : les séries ne sont pas assez longues pour que des résultats décisifs puissent en être tirés. Cependant, la juxtaposition de quelques vues a permis des comparaisons saisonnières et interannuelles.

2.4.1. Le contraste saisonnier

Le contraste entre situation de saison des pluies et situation de saison sèche est distinctement visible sur les images Landsat étudiées : l'activité chlorophyllienne de la première se marque par les basses réflectances dans le canal 5, d'autant plus accentuées que le sol est entièrement ou presque entièrement couvert. Mais l'évolution de cette activité n'est pas régulière : la végétation herbacée annuelle se dessèche très vite après la dernière pluie de la saison alors que la végétation herbacée pérenne et plus encore, les ligneux, restent beaucoup plus longtemps actifs ; dès les premières pluies, c'est la totalité du paysage qui reverdit très vite, aux exceptions citées plus haut près (*Acacia albida* notamment). Selon la date d'enregistrement et selon les dates des première et dernière pluies, l'image Landsat va donc présenter des situations végétales variables.

Les images disponibles sur le bassin de l'Eghazer wan Agadez (scène 204-048) enregistrées à deux dates de la même saison sèche (12 janvier et 17 février 1976) présentent entre elles, malgré leur proximité dans le calendrier, quelques différences.

Sur le plateau de la Tadarast, les linéaments hydrographiques sont nettement soulignés par une végétation absorbante dans le canal 5 sur l'image du 12 janvier ; ils sont beaucoup moins nets sur celle du 17 février suivant ; sur le même plateau de la Tadarast, des nuances ténues d'intensité dans les canaux 4 et 5 sont visibles sur l'image du 12 janvier ; sur celle du 17 février, celles du canal 5 ont disparu pour ne laisser de nuances d'intensité de réflectance que dans le canal 4.

Le glacis de la falaise de Tigidit, qui présente en janvier des nuances et des structures linéaires dans les trois canaux de la composition colorée paraît « simplifié » sur la vue du 17 février : les tracés linéaires sont moins détaillés et le canal 5 paraît moins nettement individualisé par rapport au canal 7 et surtout au canal 4.

Il y a donc là les traces d'un dessèchement de la végétation, les fortes absorptions passant du canal 5 au canal 4, et même d'une disparition de la végétation, le canal 7 des regs vernis prenant de l'importance.

En revanche, l'image du 17 février montre, à proximité du lac de Tigerwit, quelques taches très absorbantes dans le canal 5 que ne montrait pas l'image du 12 janvier : s'agit-il d'une végétation de décrue, spontanée ou cultivée (jardins) ?

Certaines aires ne présentent aucun signe d'évolution notable, que ce soit dans leurs contours, leur réflectance ou le contraste de réflectance avec le voisinage : c'est le cas des aires forestières *agoras* du bassin de l'Eghazer wan Agadez : les aires densément arborées de la Tadarast semblent donc s'être dessèchées plus vite que celles du bassin de l'Eghazer. Cette différence peut être imputée aussi bien à des circonstances climatiques occasionnelles (il aurait moins plu sur la Tadarast cette année-là) ou permanentes (il pleuvrait davantage sur le bassin de l'Eghazer en raison de son albedo très réduit) qu'à des causes lithologiques (on a vu que le plateau de la Tadarast porte une végétation particulière) ou hydrographiques : les affluents de l'Eghazer bénéficieraient d'un écoulement plus abondant grâce à leur vaste bassin en territoire montagneux mieux alimenté.

La végétation de saison des pluies présente sur les images Landsat des faciès variables : le contraste entre la végétation à ponctuation arborée des alluvions des grandes vallées et les dunes voisines moins couvertes est atténué en saison des pluies car le couvert devient dense et absorbant partout. En revanche, dans les aires à relief accusé de la zone septentrionale, l'eau rassemblée dans les creux favorise une végétation *temporaire* très dense et très active qui contraste avec les pentes et les interfluves restés peu couverts : c'est la situation que l'on rencontre en milieu sableux dans l'est du plateau de la Tadarast et sur les argiles de l'Eghazer (scène 203-049, vue du 25 septembre 1975).

L'image du 30 septembre 1978 de la scène 206-049 montre des nuances d'intensité d'absorption dans les canaux 4 et 5, une densité de couvert accrue par rapport à la situation de saison sèche, un accroissement de l'activité chlorophyllienne, sans qu'il soit possible de distinguer le rôle relatif des facteurs de modification et de savoir si ce rôle est stable dans l'espace et dans le temps : il faudrait là des recherches sur zones-test et des observations en saison des pluies que nous n'avons pas pratiquées. Des études sur ce sujet ont été faites dans le Ferlo (Sénégal) et au Niger (1), associant les données Landsat et l'observation sur le terrain pendant la période d'activité végétale.

Si les vues de saison des pluies étaient plus abondamment disponibles, ce qui ne paraît guère possible en raison de l'ennuagement concomitant, elles permettraient sans doute de compléter très utilement, de faciliter même, les termes d'interprétation des images Landsat en général. Les nuances de la végétation qu'elles présentent peuvent être de précieux discriminants pour la détermination de certaines formations de surface, notamment pour identifier les regs, les aires argileuses basses, les aires argileuses hautes.

Dans les régions méridionales, l'état de la végétation cultivée est un indicateur de la présence et des activités humaines mais nous ne disposons malheureusement pas d'images Landsat permettant de comparer la situation de saison des pluies avec celle de saison sèche dans les territoires fortement humanisés. Il est tout à fait probable que des enregistrements répétés et réguliers au cours de la *saison agricole* (qui correspond exactement, au Sahel, avec la saison des pluies) mettraient en évidence, comme dans les pays tempérés et selon les dates : les espèces cultivées, les jachères, les aires dégradées, les espèces spontanées conservées... Ceci à condition que la définition soit suffisante pour faire apparaître les parcelles ou les ensembles de parcelles (2).

Les données Landsat disponibles ne paraissent donc pas parfaitement utilisables pour une étude multitemporelle efficace sur de vastes territoires non plus que sur des secteurs de très petite extension. Elles peuvent être en partie complétées par celles du satellite Météosat.

Les données Météosat présentent sur l'ensemble des pays de l'Azawagh et de leur voisinage étendu des nuances *zonales* d'intensité de réflectance, nuances que nous supposons correspondre à des densités différentes du couvert végétal ou à des nuances d'albedo des formations de surface lorsque ces dernières ne sont pas couvertes.

---

(1) Etudes faites sous la direction de G. de Wispelaere, 1980 et suivantes (IEMVT).

(2) Les contours des parcelles ont rarement la forme géométrique simple qu'ils présentent en pays tempéré ; la définition Landsat les restitue difficilement ou ne les restitue pas ; par contre, la définition Spot paraît mieux adaptée à une restitution parcellaire individualisée.

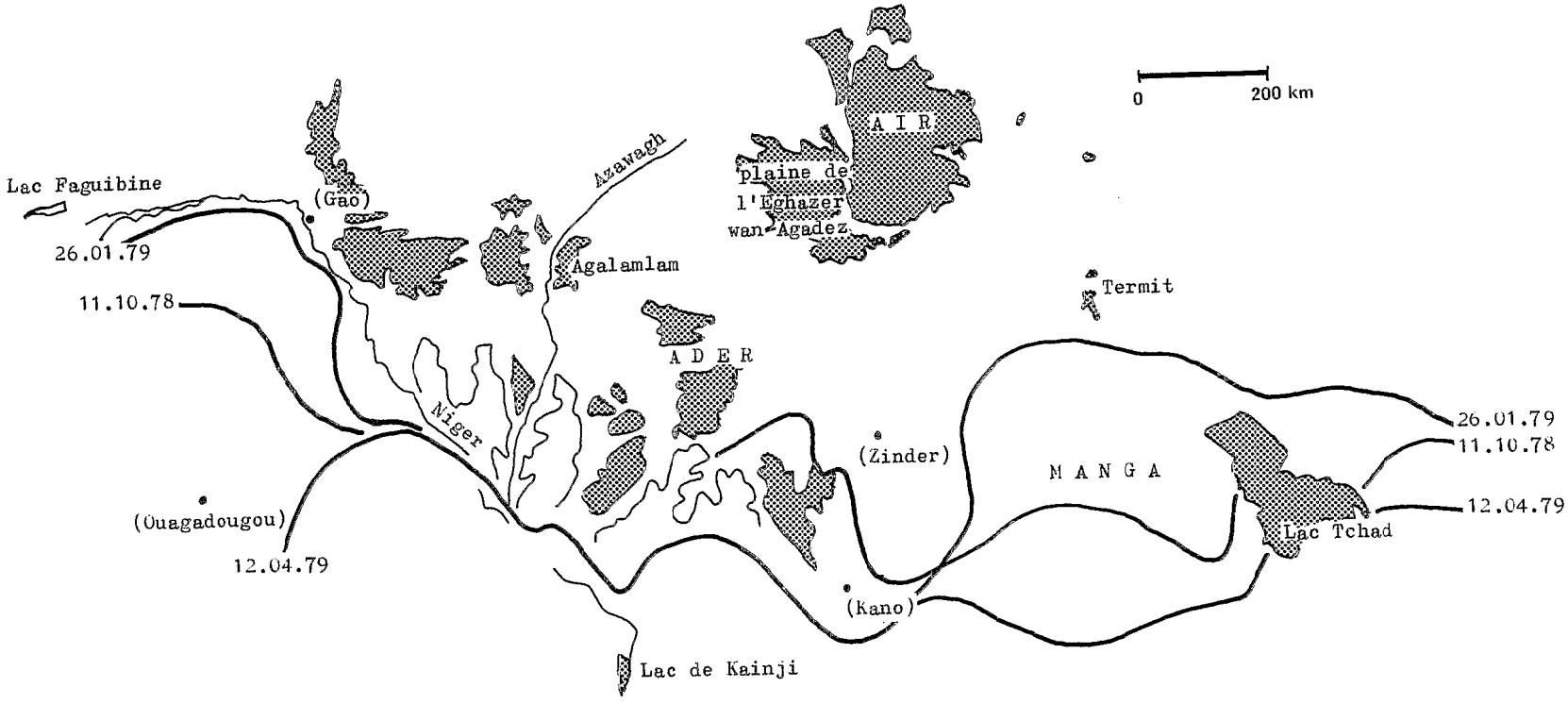


Figure 64 - Météosat, lignes de végétation sur Météosat canal visible

Pour trois dates différentes au cours de la saison sèche 1978-1979, on a tracé la *ligne verte,* c'est-à-dire la ligne de contraste net entre réflectances élevées et réflectances basses, qui semble marquer la limite nord d'un couvert végétal continu et actif entretenu par l'humidité du sol.

En janvier cette *ligne verte* est approximativement orientée nord-ouest sud-est entre Gao et Kano puis elle remonte vers le nord et passe entre Termit et le lac Tchad : dans ce dernier secteur, il est douteux que nous soyions effectivement dans une zone densément couverte de végétation active en janvier mais il faut faire la part des creux interdunaires du Manga, vastes et occupés par une végétation arborée très dense où *Hyphaene thebaica* domine. En avril, la ligne verte s'est nettement déplacée vers le sud : elle se trouve à la latitude de Ouagadougou à l'ouest et à celle du lac Tchad à l'est ; au milieu, c'est-à-dire au niveau des pays de l'Azawagh, elle paraît être stable le long du fleuve Niger.

Il semble que dans cette partie du Sahel méridional, la vallée du Niger constitue une limite presque permanente entre réflectances moyennes ou élevées au nord et réflectances basses au sud. Il n'est pas certain néanmoins que cette limite soit uniquement *végétale* et climatique : au nord, la forte absorption de la brousse tigrée et des plateaux cuirassés gène l'identification de la ligne verte ; au sud, la lithologie et le relief du massif de l'Atakora peuvent intervenir.

L'infléchissement vers le sud de la ligne verte du 26 janvier 1979 paraît difficilement explicable ; plusieurs facteurs peuvent concourir pour expliquer une réflectance élevée si loin vers le sud : d'une part une emprise humaine très importante, les champs dénudés et clairs élevant la réflectance du milieu général, lequel est conservé à l'est et à l'ouest, territoires moins densément occupés, en effet, par les agriculteurs ; d'autre part des circonstances occasionnelles ont pu défavoriser en 1979 la région comprise entre Niamey et Kano, amoindrissant le couvert végétal.

2.4.2. L'évolution inter-annuelle, la désertification

Les points de comparaison manquent pour dresser le bilan de l'évolution du couvert végétal dans les pays de l'Azawagh au cours des dernières années. L'intérêt de ce bilan serait évidemment de donner des indications sur les conséquences de la sécheresse, mais nous ne possédons que des données enregistrées *depuis* la sécheresse. En effet, celle-ci a commencé entre 1968 et 1972 et nous ne possédons pas de vues Landsat antérieures à cette dernière année. Entre 1975 et 1983, la sécheresse s'est faite moins dramatique (1) sur le plan économique mais la situation pluviométrique ne s'est nulle part rétablie dans ses quantités antérieures à 1968. L'année pluviométrique 1984 a été catastrophique partout.

Une étude fiable des dégradations du couvert végétal au moyen des données spatiales ne peut être faite qu'au moyen de données réellement comparables (dates, traitements de l'image) sur des secteurs géographiques dont la réalité du terrain est bien connue dans le détail (2).

Il est alors nécessaire de faire l'inventaire précis et détaillé des *indices de dégradation* visibles sur les données Landsat : la *dénudation* pure et simple, prolongée sur plusieurs années, en est un indice évident mais elle paraît peu répandue sur de grandes surfaces sauf exceptions : les dunes revivifiées du sud de l'Aïr, les sols dégradés de la zone agricole... La dégradation du couvert végétal, qu'elle soit d'origine naturelle ou favorisée par l'action humaine, prend couramment des formes plus ténues, peu visibles sur les images Landsat : disparition de certaines espèces sans diminution du couvert, éclaircissement léger de la strate arbustive et arborée, vieillissement des peuplements et absence de renouvellement, dénudation ou ensablement vif sur des espaces dont l'unité est trop petite pour être distincte au niveau de la résolution Landsat...

C'est ainsi que sur le plateau de la Tadarast, on rencontrait très fréquemment entre 1970 et 1975 de nombreux arbres *adaras (Commiphora africana)* renversés par le vent : comme *adaras* ne porte pas de

(1) Nous nous plaçons ici sur le plan général du Sahel tout entier ; mais depuis 1974, certaines stations ont connu des déficits pluviométriques considérables et la partie occidentale de la zone sahélienne (Mali et Sénégal) est en situation très critique depuis 1981.

(2) Cf. M.F. Courel, 1983, 1985.

feuilles pendant toute la saison sèche et que les peuplements sont dispersés, sa présence ou son absence ne se remarquent pas sur les images Landsat.

En fait, la désertification, outre une dénudation ou un appauvrissement, est le franchissement d'un *seuil d'irréversibilité* de la dégradation, d'un état à partir duquel le milieu dit d'équilibre ne peut plus se reconstituer spontanément. Pour être efficace, l'étude de ce seuil doit s'appuyer sur des études de terrain précises que nous ne possédons pas.

Néanmoins, l'examen rapide des données spatiales disponibles montre, d'une année à l'autre, des différences sensibles ou au contraire des similarités inattendues.

On a comparé les vues de 1972 (7 novembre) et de 1976 (12 janvier) sur le bassin de l'Eghazer wan Agadez, deux enregistrements présentant le territoire à des dates relativement voisines de saison sèche. Notons que 1972 a été l'année la plus déficitaire de la décennie et que 1976 ne s'est signalée ni par excès ni par défaut pluviométrique.

Un indice donne une idée préliminaire partielle de la situation hydrique aux deux dates : le lac de Tigerwit, pourtant peu profond, présente exactement les mêmes contours, c'est-à-dire qu'il a reçu sensiblement la même quantité d'eau ; on peut en inférer que dans les deux cas, la situation pluviométrique — et par conséquent la situation végétale — a été voisine. On relève en effet peu de différences d'ordre réellement végétal entre les deux images, à deux exceptions près : l'extension de la forêt *agoras* du confluent Agatara-Solomi au nord de la scène et toute la vallée de Sekiret qui présente en 1972 de larges plages claires dans tous les canaux ; la zone des sables vifs ou revivifiés du sud de l'Aïr, très « éclaircis » en 1972 par rapport à 1976, où les lignes de végétation qui soulignent les vallées paraissent nettement plus minces ; ces signes d'une rétraction du couvert végétal contribuent à mettre en évidence l'inégale réaction du milieu aux modifications climatiques.

S'il n'est pas rare de rencontrer, en pleine saison sèche, des groupes d'arbres et arbustes florissants sur des espaces parfaitement arides, il n'est pas rare non plus de rencontrer de vastes aires couvertes d'arbres morts, encore entièrement sur pied ou dont il ne reste en place que les souches, les plus grosses branches étant couchées au sol et les ramilles éparpillées (1). Il convient d'ailleurs quelquefois de mettre le mot *mort* entre guillemets car une phase sèche de plusieurs années (deux ans ? trois ans ?) peut entraîner une simple « mise en sommeil » des espèces résistantes, *Acacia ehrenbergiana* en particulier : feuilles, bourgeons et fleurs ont disparu mais l'arbre est capable de reverdir quand les conditions redeviennent favorables.

La plupart des espaces arborés disparaissent soit parce que l'écoulement d'inféroflux qui les alimente change de cours, ce qui est fréquent, soit parce que la formation toute entière, née en un an ou deux de conditions favorables, meurt, plusieurs décennies plus tard, de vieillesse naturelle (2) et il est tout à fait courant de rencontrer un peu plus loin une multitude de très jeunes arbres.

Cependant, la plupart des peuplements arborés « morts » rencontrés entre 1979 et 1982 dans la région d'Agadez étaient dépourvus de strate herbacée et envahis par des sables vifs, ce qui semble bien indiquer une dégradation réelle du milieu. C'est à la réflectance élevée de ces sables dénudés que l'on peut imputer la *non visibilité* sur les images Landsat des formations arborées sans feuilles que nous avons identifiées sur le terrain : la réflectance des branches nues, basse en principe surtout dans le canal 7, ne serait que très faiblement prise en compte au niveau de la tache élémentaire et serait complètement masquée par la haute réflectance des sables nus: l'un des indices directs les plus décisifs de la dégradation récente du couvert végétal n'est donc pas restituée par les données Landsat, mais cette dégradation est, indirectement, très apparente par la présence récente des sables dénudés très réfléchissants.

Citons à propos de l'indice de dégradation indirecte par les sables, une observation faite dans les environs de Niamey en novembre 1984: elle se situe hors de notre zone d'étude, certes, à une latitude

(1) Les branches « moyennes », aisément débitables ou transportables sont consommées par les foyers des pasteurs voisins ; troncs et grosses branches ne sont pas débitables avec les outils courants.

(2) Bernus et Poncet, 1984, et ci-dessus p. 156.

qui est celle de la ville de Dosso, mais concerne un faciès de désertification au sens propre : la route de Dosso, qui quitte Niamey par l'est, traverse des lambeaux de plateaux cuirassés, couverts de brousse tigrée ; ces aires sont affectées depuis plusieurs années par une intense exploitation du bois (transporté vers Niamey) et des frondaisons (broutées par de très abondants troupeaux) : la proximité de la capitale, considérable consommatrice de bois de cuisine, de viande et de fourrage (destiné à l'important troupeau urbain) et la proximité de la route goudronnée (axe de transport pratique) font de cette zone une aire extrêmement menacée. En 1984, la brousse tigrée n'existait plus, les bandes autrefois dénudées l'étaient toujours mais les aires autrefois couvertes de la végétation dense et buissonnante caractéristique de la formation, étaient réduites à des moignons de moins d'un mètre de hauteur, complètement défeuillés, et le sol à leur pied était recouvert de sable. Les maigres souches avaient joué le rôle de piège pour les sables éoliens mis en mouvement par toutes sortes de facteurs favorables (année particulièrement sèche, vents renforcés, végétation très dégradée), ce qui inversait littéralement le faciès radiométrique de la brousse tigrée : les bandes ondulées de « végétation » étaient devenues plus réfléchissantes que les bandes d'argiles nues. Un tel phénomène ne peut guère être rendu dans le détail par la résolution Landsat, mais l'apparition des sables clairs là où il n'en existait pas auparavant sera très visible dans l'ensemble. Sur les données Spot, où le détail des « bandes » alternées est visible, ce phénomène d'inversion des réflectances doit être perceptible. Malheureusement, nous ne possédons sur cette région aucun enregistrement suffisamment récent (la simulation Spot date de 1981) pour vérifier la restitution du phénomène et son extension.

3. L'HYDROGRAPHIE

Dans une recherche archéologique, l'étude des réseaux et des régimes hydrographiques est évidemment essentielle : en effet, les populations anciennes ont pu être à la fois attirées et repoussées par les rivières et les vallées selon le régime, le type de végétation, la facilité d'accès à l'eau... En outre, les traces hydrographiques sont susceptibles d'expliquer la situation ou la nature de certains sites d'occupation humaine, voire de contribuer à leur datation (1).

Sur les données spatiales, le fait hydrographique simple -- la localisation, le tracé -- est particulièrement net : la linéarité des formes et l'organisation en réseau le révèlent instantanément. Mais le fait hydrographique simple, apparent, ne suffit pas : il importe de connaître par quel thème est illustré le réseau ou l'objet hydrographique (eau libre, formation de surface spécifique, végétation...), si ce thème est susceptible de varier dans l'espace (des *thèmes* différents marquant des tronçons du même réseau) ; enfin, dans les régions sahéliennes et dans la perspective d'une recherche d'intérêt archéologique, il importe de connaître l'évolution des réseaux hydrographiques et leur régime au cours du passé récent.

Les « objets hydrographiques » sont en partie identifiés par des types de formations de surface et par des types de végétation que les données Landsat restituent avec une précision satisfaisante. Ils se définissent aussi par des éléments moins perceptibles sur les données Landsat : les pentes, les épisodes d'activité, les combinaisons entre les érosions linéaires et les érosions éoliennes...

Dans l'étude des pays de l'Azawagh par imagerie Landsat aux fins de prospection archéologique, nous nous sommes limités aux faits hydrographiques simples et à la recherche de quelques indications succinctes sur leur dynamique.

---

(1) cf. Bernus et Poncet 1984 à propos du site rupestre d'Afara, partiellement enfoui sous les alluvions sableuses du kori datées de la période 5 000 B. P. au plus tôt.

3.1. L'HYDROGRAPHIE ACTUELLE

3.1.1. Un cas particulier : l'eau libre

La plus simple identification du fait hydrographique est évidemment celle de l'eau libre. Le thème *eau libre* (ou l'ensemble des thèmes *eau libre* si l'on détaille les profondeurs et les éléments en suspension) est particulièrement net sur les images Landsat en raison de la très forte absorption de la lumière dans le canal 7 ; sur les compositions colorées standard, l'eau libre se traduit par des teintes bleues très caractéristiques.

Dans les pays de l'Azawagh, le thème *eau libre* ne se rencontre que rarement et sur des secteurs limités ; il constitue un cas particulier, voire artificiel.

Le fleuve Niger est le seul plan d'eau linéaire et continu. Il ne concerne les pays de l'Azawagh que de façon marginale, mais il constitue un repère utile sur les images Météosat, canal visible et canal infrarouge. La définition de la tache élémentaire de Météosat Visible (2 500 mètres) ne permet pas que soit rendue visible l'eau libre du fleuve proprement dit : au cours des périodes d'étiage — l'image du 12 avril 1978 que nous avons examinée — la largeur du fleuve n'excède pas 400 mètres, sauf dans les cuvettes qui sont parsemées d'îles nombreuses. Autant que l'eau du lit mineur, ce sont les rives qui sont absorbantes dans l'infrarouge proche : les pelouses de décrue, les jardins, les grands arbres bordant le lit majeur...

Ailleurs, on ne repère en saison sèche sur les données Landsat que les très grandes mares permanentes: parmi les mares naturelles, celles de Anderambukan, dans la vallée de l'Asakaré (scène 207-049), celle de Tabalak (scène 205-049), les mares de Kao et Mogger ; parmi les plans d'eau artificiels, le lac de Tigerwit dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez (scène 204-048). Le lac de Tigerwit, très peu profond et chargé de particules argileuses en suspension, présente des nuances qui correspondent soit aux variations de profondeur soit aux variations de turbidité ; la question n'est pas abordée dans le détail ici faute d'informations précises acquises sur le terrain.

Les mares prolongées de la Tadarast (celle de Shi Walemban en particulier) ne sont pas visibles : c'est qu'elles sont étroites et allongées, bordées de végétation dense aux couronnes arborées de grandes dimensions, parsemées d'arbres vivants; au cours de la saison sèche, l'eau sans cesse remuée par le piétinement du bétail et raréfiée par la consommation et l'évaporation, se charge de particules argileuses et devient tout à fait opaque : il est possible qu'elle ne soit plus marquante en tant que telle, mais qu'elle prenne la même réflectance que les berges argileuses et arborées.

Sur les vues du mois de septembre en revanche, l'eau libre est fréquente, en particulier sur la vue du 30 septembre 1978, scène 206-049. Elle apparaît dans des mares de taille importante que les cartes topographiques n'indiquent pas comme telles (1) soit parce qu'elles sont très temporaires, soit parce qu'elles sont d'apparition récente, peut-être favorisées par un bourrelet sableux, un changement de cours... Surtout, l'image de septembre 1978 en composition colorée révèle la multitude des bas-fonds interdunaires remplis d'eau dans toute la région comprise entre Takanamat et Sanam (dans la partie sud-est de la scène 206-049) : les pointillés bleus y sont nombreux, vaguement alignés le long de talwegs peu perceptibles ou éparpillés sans organisation visible.

3.1.2. Les réseaux actuels et leur dynamique

Les indices qui permettent de déceler le fonctionnement (sinon l'écoulement au sens propre, du moins la présence d'eau) des tronçons hydrographiques des pays de l'Azawagh sont apparemment contradic-

(1) Elles sont indiquées comme « zones inondables » : ce thème des cartes topographiques est d'utilisation incertaine car trop généreusement distribué à travers tout le pays, y compris dans des lieux qui n'ont pas connu depuis fort longtemps de concentration d'eau sous forme de plan libre ; il est vrai cependant que de telles concentrations dépendent davantage des pluies occasionnelles que de la configuration topographique.

toires : l'un est constitué par la présence de formations de surface alluvionnaires, dénudées, juxtaposées à un voisinage plus ou moins couvert de végétation ; l'autre est au contraire la présence d'une couverture végétale nettement plus dense que celle du voisinage. Formations de surface et types de végétation permettent d'aborder la dynamique actuelle de ces réseaux et les traces d'inadaptation.

C'est dans les zones les plus septentrionales des pays de l'Azawagh que le fonctionnement des vallées se marque par la dénudation. Dans les aires sableuses, les sables nus des lits mineurs ont une réflectance très élevée dans tous les canaux qui tranche avec les sables faiblement couverts (un peu absorbants dans le canal 4 et dans le canal 5): ceci est visible dans les vallées à fonctionnement temporaire mais réel du massif de l'Aïr (scènes 204-048 et 204-047), de sa bordure occidentale immédiate et du glacis de la falaise de Tigidit. Les sables de ces vallées ont été arrachés aux aires hautes (les massif de l'Aïr, le plateau de la Tadarast) au cours de la dernière transition entre *pluvial* et *aride,* au cours de la dernière période d'assèchement important : A. Morel date ces alluvions (1) de 5 000 BP au plus tôt.

Sur la bordure ouest de l'Aïr ces alluvions sableuses ont empli des lits profondément creusés ; depuis, une reprise d'érosion a façonné dans ces sables des terrasses de plusieurs mètres de hauteur ou de simples banquettes ; la végétation arborée et buissonnante s'y est installée en bordure même du lit actuel en lignes étroites, rideaux imperceptibles sur image Landsat photographique ou masses plus importantes occupant les rives concaves et soulignant les sinuosités du lit actuel : c'est le cas de la vallée du Telwa dans sa partie montagneuse, où lit actif et végétation des rives sont bien visibles (scène 204-048). La violence des crues et l'absence de cohésion des éléments sableux empêchent la végétation de se fixer durablement dans les lits actifs. Ce sont ces aires dénudées qui sont nettement visibles sur les images Landsat.

Dans la plaine argileuse de l'Eghazer wan Agadez (2) on peut suivre l'avancée des sables alluvionnaires sur les argilites mais les indices de fonctionnement actuel ne sont guère visibles : c'est que les vallées sont occupées par les formations arborées *agoras* au milieu desquelles les axes fonctionnels étroits et instables ne sont pas perceptibles.

Après quelques kilomètres au milieu des argilites, les lits à alluvions sableuses font place à des lits argileux, souvent calibrés en *channels* réguliers et stables, creusés dans les argiles kaoliniques et montmorillonitiques des vallées : ces lits *récents* et fonctionnels ne sont pas perceptibles sur les images Landsat car il n'y a aucune différence de matériau ni de végétation, donc aucune différence de réflectance, entre eux et leur voisinage, les rives actuelles. La végétation maigre et irrégulièrement dispersée sur la zone des argilites n'est guère plus abondante à proximité des cours d'eau sinon en minces rideaux discontinus invisibles sur les images Landsat en composition colorée à 1/500 000. Les linéarités très sombres qui marquent nettement les vallées dans la zone des argilites sont en fait les traces d'une hydrographie ancienne que nous abordons plus loin. Néanmoins, le « delta » actuel de l'Eghazer wan Agadez, dans la région de Teggida n Tesemt semble bien marquer la limite extrême de ses crues habituelles ; en 1975, toutefois, une linéarité très sombre sur le fond clair des sables, vraisemblablement due à un dépôt d'argiles alluvionnaires d'amont dans l'axe d'écoulement occasionnel, marque la vallée de l'Eghazer au-delà de ce « delta » en direction d'In Abangharit (scène 205-048, vue du 5 février 1975).

A l'ouest du bassin de l'Eghazer et sur la même latitude, les traces d'hydrographie actuellement fonctionnelle perceptibles sur image Landsat disparaissent : les tronçons hydrographiques ne sont plus suffisamment alimentés pour que se conservent des traces nettes d'écoulement ; les réseaux ont d'ailleurs disparu ou se sont désorganisés ; celui de l'Azawagh n'échappe pas à cette inadaptation.

Au sud du 16e parallèle, les traces d'hydrographie fonctionnelle se marquent plutôt par une végétation dense, distribuée linéairement le long des vallées actives ou rassemblée dans les aires temporairement humides. c'est le cas des vallées de la Tadarast : vallée de Shi Walemban, de Tadbuk, d'In Waggar ; la végétation arborée dense qui s'y trouve les indique par des réflectances basses dans les canaux 5 et 7. La linéarité est bien perceptible sur les images Landsat, qui donne ainsi un tracé plus net et plus continu que les cartes de l'IGN ne le figurent et que le paysage lui-même ne le laisse percevoir sur le terrain. Les épaississements du trait végétal

(1) *Carte géomorphologique de l'Aïr,* aimablement communiquée par l'auteur avant publication.

(2) L'étude hydrographique de la plaine de l'Eghazer wan Agadez a été effectuée au moyen des données Landsat et des photographies aériennes disponibles ; elle est publiée dans Bernus et Poncet 1984.

indiquent des aires où se sont installées des mares plus ou moins durables ; leur netteté (qui traduit la spécificité de la végétation) peut avoir pour origine la netteté du relief dans lequel s'inscrivent ces vallées : bien que peu perceptibles sur le terrain, les pentes convexes délimitent nettement les axes de concentration des eaux, donc de la végétation. Les effets sont particulièrement visibles en saison des pluies et la scène 203-049, vue du 25 septembre 1975 est significative : le moindre talweg, la plus petite ligne de drainage est soulignée par un mince trait de végétation active, très absorbante dans les canaux 4 et 5 ; l'ensemble dessine dans tous ses détails un réseau hydrographique très hiérarchisé (cf. photo de couverture).

Au fur et à mesure que l'on progresse vers le sud, c'est-à-dire vers des zones où l'alimentation pluviométrique directe est plus abondante, les aires végétales marquant la présence régulière de l'eau se font plus larges et plus denses mais les systèmes d'écoulement paraissent rester ceux qui prévalent dans la Tadarast : écoulements peu distincts entre des mares en chapelet.

Les systèmes endoréiques sont nombreux ; ils constituent même la règle dans toute la partie centrale des pays de l'Azawagh. On a vu plus haut qu'ils n'étaient pas toujours identifiables comme *objets hydrographiques* (mares, sebkhas) en raison de leur forme indifférenciée et que la végétation qui les recouvre ou les encadre n'implique pas qu'ils soient effectivement en eau pendant une partie de l'année : la présence d'une végétation dense sur la totalité d'une aire lacustre ou palustre semble indiquer au contraire que celle-ci n'est pas réellement « inondable » ou qu'elle l'est pendant très peu de temps, sinon les racines seraient asphyxiées...

Nous n'avons pas noté de différences saisonnières dans les tracés hydrographiques tels qu'ils sont mis en évidence par les lignes de végétation : ces dernières sont plus nombreuses, plus contrastées avec le voisinage et présentent une hiérarchie plus complète en saison des pluies ; sur la vue du 30 septembre 1978, on peut, plus aisément que sur la vue de saison sèche (19 février 1976) suivre le parcours contourné et les méandres qui relient l'Azar à l'Azawagh au sud du massif d'Agalamlam (scène 206-049). Ces figurations permettent de suivre la continuité de certains axes anciens désormais peu visibles (l'écoulement exceptionnel de l'Eghazer wan Agadez au delà de son « delta » terminal, par exemple) ou de constater une différence de tracé entre un axe ancien et l'axe actuel.

Dans une même région, certains axes hydrographiques sont plus ou moins distincts, plus ou moins contrastés avec leur environnement d'une vue à l'autre : c'est ainsi que nous avons été amenés à utiliser toutes les vues disponibles de la scène 204-048 et la vue de la scène 205-048, qui la recouvre en partie pour dresser un croquis cartographique de l'hydrographie du bassin de l'Eghazer wan Agadez. Les vues correspondant à des paysages « humides » (saison des pluies ou année particulièrement pluvieuse) sont certes très utiles, mais aussi les vues de saison sèche sur lesquelles la végétation linéaire dense des fonds de vallées est très contrastante avec les environs desséchés.

Enfin, si les tracés paraissent présenter une certaine stabilité d'une saison à l'autre, d'une année à l'autre, il n'en est pas de même si on fait des comparaisons à plus long terme, entre les images Landsat (enregistrées entre 1972 et 1978) d'une part et les cartes topographiques (issues de couvertures aériennes effectuées entre 1955 et 1965). On n'a certes pas l'assurance que les cartes aient été réellement exactes (elles peuvent présenter des erreurs d'interprétation ou de généralisation, des incertitudes) et donc que les différences de tracé soient significatives... Ceci dit, les différences sont nombreuses, notamment sur le glacis de la falaise de Tigidit (scène 204-048) du bassin de l'Eghazer wan Agadez, dans la partie concave du tracé de la cuesta : l'éventail convergent des axes d'écoulement installés sur un cône d'accumulation recreusé ensuite est relativement instable et les confluences sont variables dans le détail. Il en est de même au sud d'Agadez, dans la région où les deux branches principales de ce qui, en aval, constituera l'Eghazer wan Agadez, présentent des variations de tracé importantes : une étude de terrain et l'examen détaillé des photographies aériennes permettraient de déterminer la succession des tracés et des phases d'écoulement...

Ces changements de parcours contribuent à mettre en évidence la complexité de certains secteurs du bassin de l'Eghazer wan Agadez : le « delta » terminal, par exemple, se comporte quelquefois comme un bassin d'alimentation, le sens de l'écoulement s'inversant dans le coude d'Azelik, à la fois dans le lit de l'Eghazer et dans son minime « affluent » le Tiegubay.

Dans les régions de l'Azawagh central, les tracés paraissent plus stables : il est vrai qu'ils sont « canalisés » par des vallées plus nettement incisées et par des ensablement fixés.

3.2. LES INDICES D'HYDROGRAPHIE ANCIENNE

Les réseaux hydrographiques *anciens* sont de vastes ensembles mis en place au cours des épisodes humides et très humides prolongés du Quaternaire récent. Sur les images Landsat, ils se traduisent par des *surfaces* et non plus par des *lignes* et leurs unités taxonomiques couvrent des territoires beaucoup plus vastes que les minces vallées actuelles. Alors que les hydrographies *actuelles* sont perceptibles parce qu'elles correspondent à des *creusements* (sables nus des lits fonctionnels, vallées marquées recueillant les écoulements latéraux), c'est par leurs alluvions, c'est-à-dire par des *accumulations* que les hydrographies anciennes sont perceptibles.

3.2.1. Les indices alluvionnaires

Les accumulations dans les grandes vallées mortes des pays de l'Azawagh présentent, sur le terrain et sur image Landsat, des caractères différents de ceux des territoires environnants ; bien que les premières et les seconds soient dans la plupart des cas, des sables, ces sables n'ont pas la même origine, ils n'ont pas subi les mêmes remaniements ni les mêmes façonnements de détail ; actuellement, ils ne portent pas le même type de végétation ; c'est cette différence de végétation qui, dans la plupart des cas, met en évidence la présence des alluvions anciennes et le tracé des grandes vallées fossiles.

On a vu plus haut (chapitre *Végétation*) quelle différence il y a entre les sables éoliens des rives de l'Azawagh et de l'Azar aux environs du 16e parallèle (exemples In Kutayan et Tin Jekoda, p. 165 et 166) et les sables fluviatiles des deux vallées : ces derniers portent une végétation arborée beaucoup plus dense, marquée sur les données Landsat par un accroissement de l'absorption lumineuse dans le canal 5. Les vallées de l'Azawagh, de l'Azar, du Tadist, de l'Azagaret sont ainsi rendues distinctes, non pas par la linéarité de leur écoulement, mais par leur extension en longueur et en largeur. Apparaissent alors des tracés anciens qui ne figurent pas sur les cartes topographiques : le haut Dallol Mawri aux environs du parallèle 15° (où il ne porte pas encore ce nom) et l'Asakaré (ou Asakaraï) tout près de son « confluent » avec l'Azawagh, n'y sont suggérés que par la courbe de niveau qui encadre approximativement leurs vallées. Mieux : les cartes ne raccordent pas la Majiya d'Illela (1) au Dallol Mawri : sur les images Landsat au contraire (scène 206-050) la végétation dense qui occupe la vallée est bien nette et raccorde effectivement le système occidental de l'Ader à celui du Dallol Mawri par Dogon Kirya et Bagaji. Il ne s'agit pas là d'un écoulement actuel à proprement parler mais la netteté et la largeur de l'espace couvert de végétation impliquent un écoulement d'inféroflux notable; or, la carte topographique (feuille *Bagaroua*) n'indique que les talus des deux rives.

La scène 206-050, vue du 26 mars 1976 montre bien la différence de réflectance et de texture que présentent chacun des deux dallols à la même latitude (celle de Filingué par exemple) : cette différence de faciès radiométrique peut être imputable à une différence pédologique (les matériaux alluvionnaires n'ont pas la même origine et ils ont évolué différemment) et par conséquent à une différence de végétation et d'exploitation par l'homme : nous sommes ici dans la zone agricole et les deux vallées sont très cultivées.

---

(1) Plusieurs vallées de l'Ader portent le nom de *Majiya* ; *majiya* est un terme non usuel, d'usage local en Kebbi (Nigeria) où il signifie la première inondation de la saison, en opposition à *midiri* (l'inondation continue) (Bargery, 1934). En Ader et Gobir, il semble avoir été introduit par un usage colonial. La plus connue d'entre les Majiya est celle de Malbaza, qui a fait l'objet d'importantes opérations de développement agricole et qui se trouve à l'est de la Majiya d'Illela. Pour les différencier, nous leur accolons ici le nom de la principale localité de chacune des vallées.

3.2.2. Les textures orientées

En dehors des vallées mortes de l'Azawagh et de ses principaux tributaires anciens, bien délimitées sur le terrain entre des rives nettes et sur image Landsat par des caractéristiques radiométriques différentes du voisinage, on distingue sur certaines vues des linéarités susceptibles de correspondre à d'anciens axes hydrographiques, moins nettement marqués dans la topographie cette fois, ténus et « suggérés » plutôt que nettement identifiables.

L'exemple du secteur d'Afara-Tuluk, d'après les photographies aériennes AOF 1955-56 et les vues Landsat de la scène 204-048, 28 juin 1975 et 12 janvier 1976, compositions colorées à 1/500 000.

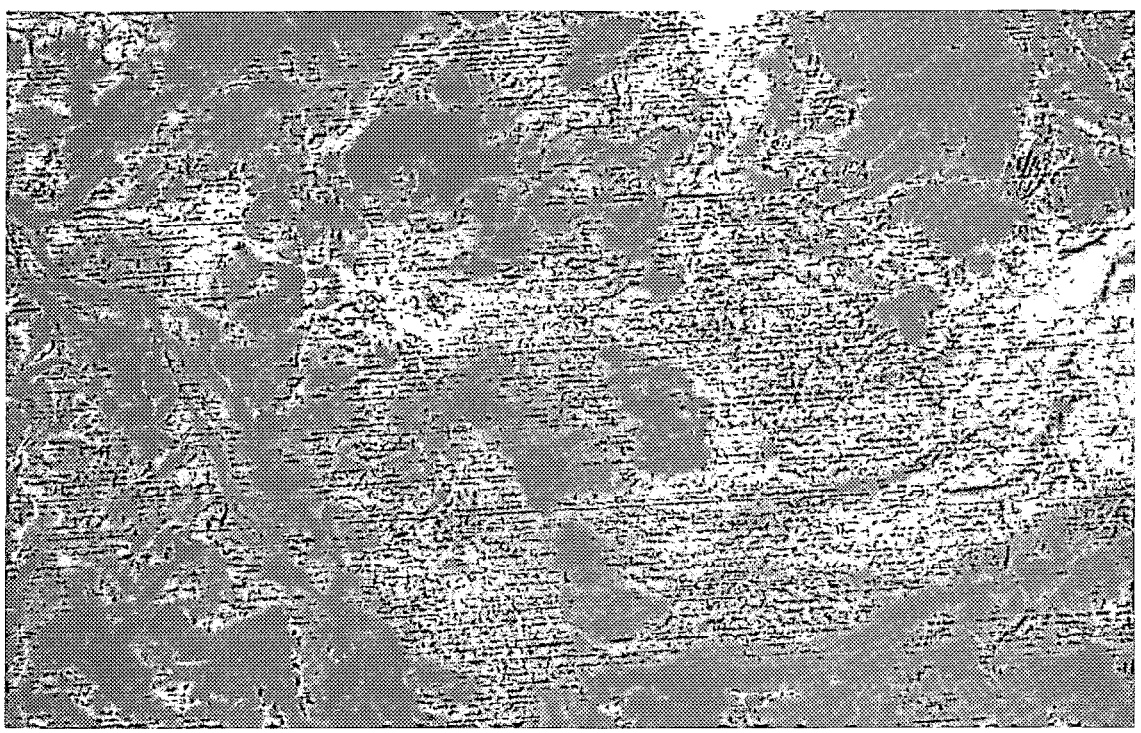


Figure 65 - Image Landsat de la région d'Afara - Tuluk, scène 204-048 vue du 12.01.76, traitement photographique, canal 5, 1/500 000, vue partielle.

Le secteur d'Afara-Tuluk se trouve dans la partie orientale de la plaine de l'Eghazer, au contact entre les *grès d'Agadez* et les *argilites de l'Eghazer.*

A l'est du massif de Tageyt (*grès d'Agadez* en relief au dessus de la plaine sableuse de la même formation) l'image Landsat présente les sables faiblement couverts d'une végétation discontinue en saison sèche, sous la forme d'une structure sub-linéaire en arc contournant le massif. Nous supposons qu'il s'agit là d'une organisation de la végétation en lignes sub-parallèles suivant un axe favorable, une concentration des eaux

imperceptible ou un sol capable d'une meilleure rétention de l'eau, suggérant un axe hydrographique. Ni les cartes topographiques ni les photographies aériennes de 1955-56 ne restituent cette structure : les premières sont trop généralisées et incomplètes sur cette région, nous l'avons vu ; mais elles confirment que l'altitude s'abaisse régulièrement le long de l'axe, du sud au nord ; les secondes ne restituent pas le détail de la végétation...

Il est donc possible qu'une ancienne vallée — dont il ne reste plus d'indice visible en surface sur le terrain — ait drainé vers le nord les eaux du Telwa (il reste, dans l'évolution de la forme de la forêt de Kerbubu quelque trace de cette ancienne organisation), captant au passage celles du kori d'Afara et rejoignant l'Eghazer wan Agadez par le système de Tuluk. Il ne reste plus rien actuellement de ce réseau, si ce n'est le kori d'Afara et celui de la Sakamar qui prennent leur source dans l'Aïr et sont régulièrement alimentés : les deux vallées présentent des traces d'écoulement actif et très érosif jusqu'à la sortie des gorges épigéniques ; elles se perdent ensuite sur un cône d'épandage, particulièrement marqué par la végétation dans le système d'Afara. L'ancien cours disparu est jalonné de points d'eau dont celui de Tuluk, considéré comme *source,* est particulièrement peu profond ; il est aussi jalonné de sites archéologiques nombreux et importants.

Il est difficile de préciser la période à laquelle cet écoulement était encore fonctionnel : les traces très récentes (1955-56) de l'orientation vers le nord du bas Telwa, l'alignement d'habitats anciens (non datés pour le moment mais de faciès néolithique et post-néolithique) semblent indiquer un fonctionnement postérieur à la période 5 000 BP qui date ailleurs les alluvionnements intenses, donc un écoulement important mais en régression. Les indices d'activité humaine considérable dans cette région aux périodes médiévales et post-médiévales (sites de Tegidda n Adrar, Tegidda n Tageyt, Tuluk...) peuvent aussi laisser penser que l'écoulement du système d'Afara-Tuluk-Telwa, aujourd'hui disparu et presque invisible, s'est poursuivi ou a repris au cours des courtes périodes relativement humides du « moyen-âge » et du 18e siècle...

Le même type de structure marque la grande vallée de Sekiret désormais non fonctionnelle mais dont les alluvions sableuses à végétation discontinue (herbacées et ligneux épars) se marquent nettement entre les argilites depuis l'Aïr jusqu'à la complexe région située au nord de Tegidda n Tesemt : la vue du 5 février 1975, scène 205-048 présente ce dernier secteur sous une forme particulièrement lisible car la végétation a été très active au moment de l'enregistrement : on peut ainsi suivre aisément les linéarités correspondant à des alluvionnements ou à des axes d'écoulement anciens dans la vallée de Sekiret et les passages présumés vers l'Eghazer wan Agadez.

Sur la même vue, on distingue, bien que partiellement masquées par les nuages, des traces présumées fluviales qui relient les systèmes de l'ouest du bassin à l'Eghazer à l'Eghazer wan Agadez lui-même par la région de Chin Tafidet... Or le site archéologique de Chin Tafidet, riche et original (1) contient des restes de poissons et de sauriens en nombre exceptionnellement grand, signe qu'on y a pratiqué la pêche plus activement ou plus longtemps que dans les autres sites de même période de la région d'Agadez.

Il aurait été intéressant de rechercher des traces alluvionnaires par la végétation dans la région d'In Abangharit dans laquelle se situe la confluence des grands fleuves issus des massifs montagneux (le Timmersoï descendant de l'Ahaggar, l'Eghazer wan Agadez, les vallées de Tasedet, d'Anu Zeggerin et d'Arlit descendant de l'Aïr) : malheureusement, les vues disponibles sur la scène 205-047 sont de qualité très insuffisante (absence de contrastes, flou général, brume ou poussière en suspension) pour qu'il en soit efficacement tiré parti.

(1) Le site principal de l'ensemble de Chin Tafidet a livré des débris de cuisine en grande quantité et surtout des sépultures animales : bovins, chiens... cf. F. Paris, 1984.

3.2.3. Une approche des dynamiques anciennes

Les dynamiques fluviales ne peuvent utilement être étudiées qu'au moyen d'observations de terrain précises, assorties d'analyses de laboratoire. Nous avons cherché cependant, à travers des exemples choisis dans des aires géographiques limitées, si les images Landsat étaient susceptibles de fournir ou de confirmer quelques indications sur les épisodes d'écoulement et les modes de fonctionnement *anciens.*

a) Le secteur de Tegidda n Tesemt - Azelik (d'après image Landsat en composition colorée du 12 janvier 1976, vue 204-048) :

Par communication orale faite à sa base de Tegidda n Tesemt, l'un des géologues de l'équipe de prospection de la société IRSA avait signalé avoir relevé trois niveaux de terrasses fluviales dans la région de Tegidda n Tesemt - Azelik, sans plus de précision.

L'examen de la répartition géographique des formations de surface sur les images Landsat, celui des cotes d'altitude sur les cartes topographiques et quelques observations de terrain nous permettent de proposer la description suivante :

1. Une terrasse basse, récente, constituée de montmorillonites, caractérisée par des réflectances très basses dans tous les canaux ; ces montmorillonites se seraient formées dans des marécages ou sous un régime à écoulement lent, régulier et abondant, par le dépôt d'éléments fins issus d'un milieu couvert de végétation et pourvu de *sols* au sens pédologique ; elles marquent le lit majeur de l'Eghazer wan Agadez jusqu'au « delta » terminal, plusieurs grands affluents de rive droite et de rive gauche ; elles pourraient, à la lumière d'indices archéologiques, botaniques et géomorpholoigques dans le détail desquels nous ne voulons pas entrer ici et à la lumière des travaux effectués par J. Maley (1) correspondre à la période pluviale — 6 000 à — 4 000 environ (2).

2. Une terrasse « moyenne », plus ancienne, constituée d'argiles kaoliniques et de cailloutis, développée surtout dans l'Eghazer inférieur à partir d'In Jitan : ces argiles sont d'aspect très varié sur les images Landsat (cf. chapitre *Formations de surface*), difficiles à localiser et à délimiter. Cette terrasse aurait été mise en place au cours de la phase pluviale précédant celle qui a mis en place les montmorillonites, entre — 11 000 et — 8 000 environ.

3. Une terrasse « haute », encore plus ancienne, très entaillée par une érosion postérieure à sa mise en place et par l'érosion actuelle, constituée de cailloutis vernis : les hauteurs d'Erawen Zegiran entre les vallées de l'Eghazer wan Agadez et de Sekiret en seraient un lambeau de même que les cailloutis sombres qui s'appuient sur la face sud de la dune d'Azelik et les hauteurs du « goulet » entre lesquelles devait passer autrefois le kori de Fagoshia. Il est difficile de dater cette terrasse car il est possible que ses matériaux aient été remaniés et correspondent eux-mêmes à des formations fluviatiles plus anciennes.

Cette interprétation ne peut être qu'hypothétique car fondée sur des données locales et partielles : il faudrait raccorder ces terrasses aux autres formations de surface d'origine présumée fluviatile qui ont été relevées sur les vues Landsat mais n'ont pas été formellement identifiées comme *terrasses fluviales.*

L'image Landsat contribue donc à mettre en évidence la complexité de l'histoire hydrographique du bassin de l'Eghazer wan Agadez en soulevant un grand nombre de questions.

---

(1) Maley, 1981. Ces études concernent des régions autres que l'Aïr et ses bordures : les chronologies et conclusions ne sont donc pas systématiquement applicables à la région d'Agadez.

(2) Ces indications chronologiques s'entendent par rapport à l'année zéro (A.C.).

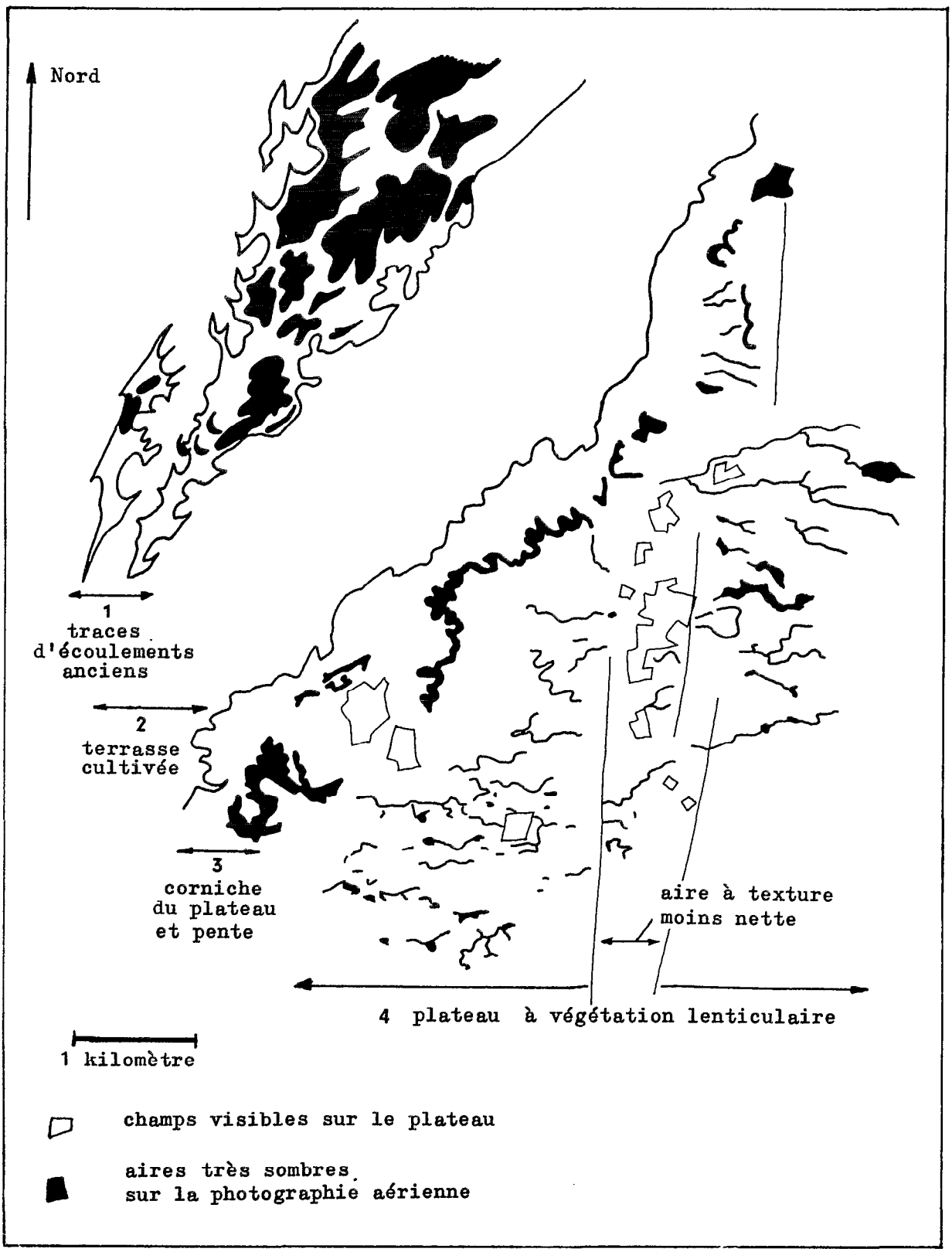


Figure 66 - Indika, croquis d'après photographies aériennes 75 NIG 40/600 5673

b) Le secteur d'Indika (feuille *Filingué*) d'après les photographies aériennes NIG 75 40/600 (1975, 1/60 000) n° 5672, 5673, 5674 et la vue du 26 mars 1976, scène 206-050 en composition colorée (cf. figure 79, hors-texte).

Le secteur est centré sur la rive gauche de l'Azawagh, à la latitude 14° 30', c'est-à-dire en zone agricole.

Sur les photographies aériennes, la vallée de l'Azawagh et sa bordure de rive gauche se décomposent ainsi (figure 66) :

1. Une aire sombre et très sombre, à tracé présumé hydrographique en forme de « flammes », caractéristique de la vallée de l'Azawagh et, parmi les grandes vallées fossiles, d'elle seule ;

2. Une aire gris moyen, dans laquelle se trouvent la plupart des champs cultivés, plus clairs, à contours géométriques ;

3. Une aire très claire, bas de pente du plateau dont le couronnement cuirassé et verni est lui-même bien visible et très sombre ;

4. En arrière du rebord de plateau, une zone sombre à végétation lenticulaire contrastée très sombre, à défrichements très clairs : on a là la même texture et le même faciès d'image que dans la région de Dinkildimi (p. 173) située 50 km au sud-est.

L'image Landsat restitue tous les contrastes avec beaucoup de netteté et met particulièrement en évidence la structure « flammée » des aires très absorbantes du milieu de la vallée.

Ces aires sombres et très sombres, qui s'étendent tout le long de la vallée entre la région de Tajinjer et celle de Tukunus (c'est-à-dire entre les latitudes 16°40' et 14°30' environ) semblent correspondre à la partie la plus basse de la vallée (actuellement non fonctionnelle), à la dernière phase d'écoulement de l'Azawagh. Cet écoulement a laissé des alluvions argileuses sur lesquelles se sont installés des ligneux en peuplements denses, actuellement alimentés en eau par la stagnation temporaire en saison des pluies.

La présence d'argiles et la forme des unités suggère un écoulement lent, une morphologie marécageuse en mares, étangs, chenaux anastomosés et inversions du sens général de l'écoulement s'insinuant entre des bourrelets sableux. La stabilité de ces formes en flammes est remarquable : d'une vue Landsat à l'autre, elles présentent des contours absolument identiques ce qui suggère que ces anciens axes d'écoulement ou de stagnation de l'eau ne sont plus affectés par aucune modification hydrologique et ne sont plus fonctionnels. On verra plus loin (l'exemple du secteur de Fabiji) que les axes d'écoulement ancien de la partie sud du dallol présentent au contraire des indices d'évolution sensible au cours des trente dernières années. Les bourrelets seraient issus de phases d'écoulement plus anciennes, déposant des alluvions sableuses, éventuellement reprises par le vent entre deux épisodes fonctionnels.

Mais la vallée de l'Azawagh ne présente pas partout cette structure simple. Les deux exemples suivants donnent un aperçu de structures différentes.

c) Le secteur de Tabotakit (feuillet *Tigezefen*) d'après les photographies aériennes 75 NIG 40/600 (1975, 1/60 000) n° 3633, 3634, 3635 et la vue Landsat du 26 mars 1976 scène 206-050 en composition colorée à 1/500 000 (cf. figure 79, hors-texte)

Le secteur de Tabotakit est situé à 40 kilomètres environ au nord de celui d'Indika, sur la même rive de l'Azawagh.

Le milieu de la vallée est marqué, comme à Indika, par les structures flammées qui correspondent aux argiles et à la végétation d'un « lit mineur » récent de l'Azawagh.

Sur les photographies aériennes, la vallée proprement dite et sa rive gauche se divisent en trois unités :

1. *La basse terrasse sableuse lisse, sans texture apparente, gris moyen sauf les champs géométriques* très clairs,

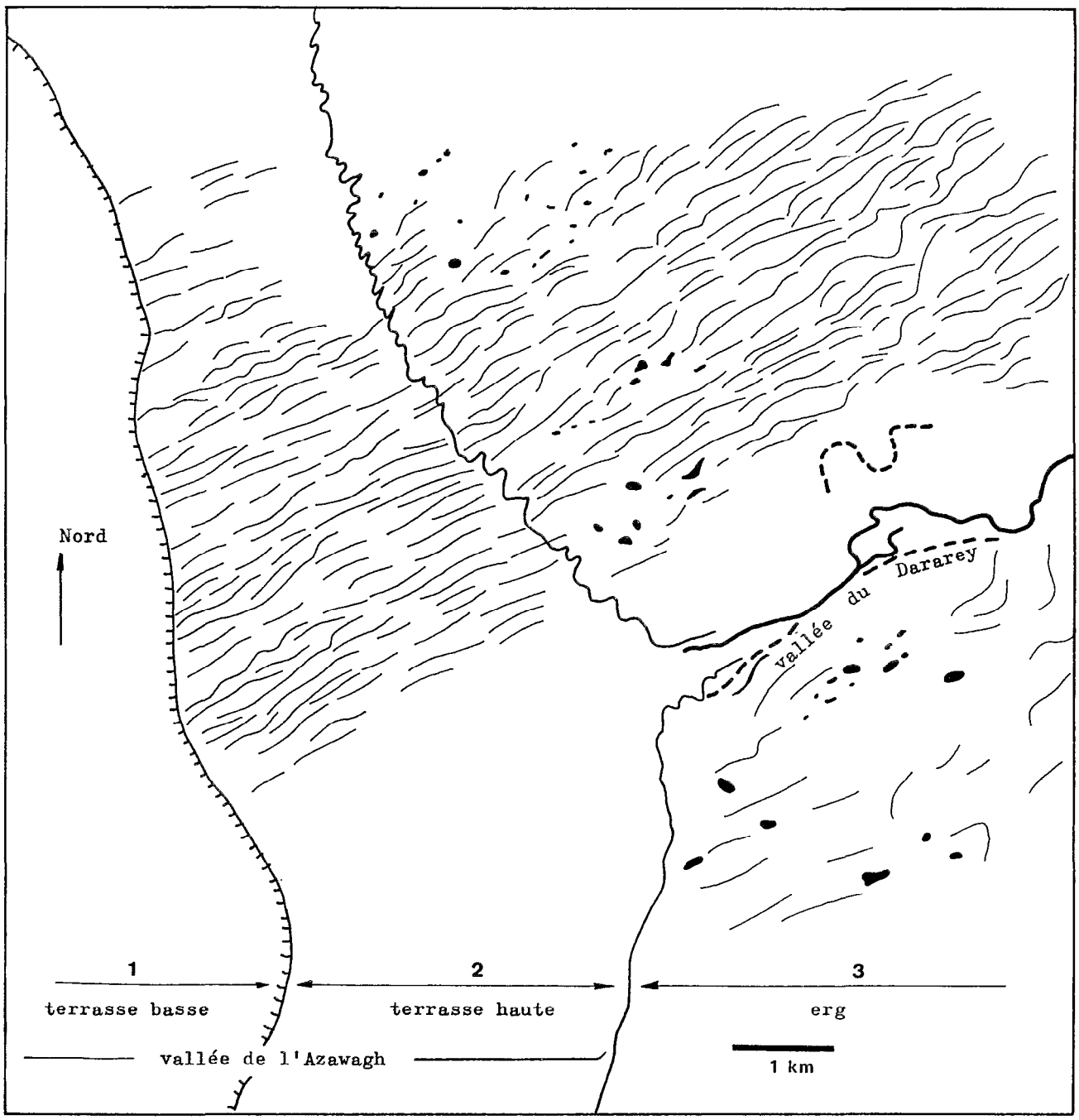


Figure 67 - Tabotakit, croquis d'après photographies aériennes 75 NIG 40/600 3634

2. Une terrasse dont le rebord est peu élevé mais présente une ligne de rupture de pente très nette ; elle a été remaniée par le vent en fines rides orientées nord-est sud-ouest (l'orientation dunaire générale de l'Azawagh central) couvertes de végétation herbacée. L'ensemble présente la même brillance que la vallée inférieure à ceci près que le sommet des dunes est plus clair que leur pente : on a là l'inverse de ce qui a été relevé ailleurs (secteurs de Tin Drarin, de Tajinjer) où le sommet des dunes est plus sombre que leurs pentes parce que davantage couvert de végétation ; faut-il voir dans cette différence le rôle de la pluviométrie ou celui du sol ?

3. Bordant la vallée, une zone à rides éoliennes fines (les mêmes que précédemment) mais où les bas-fonds sont nombreux et couverts de végétation dense, sombre. Les dunes sont ici nettement plus claires que les deux ensembles sableux précédents, leurs flancs sont cannelés par l'érosion et semblent dépourvus de végétation : disposition inverse de la précédente.

Sur la terrasse fluviale débouche un affluent de l'Azawagh, l'Azar Dararey, bien marqué par une incision nette de la rive dunaire ; cet affluent montre des traces de méandres et de changements de parcours ; il semble saisonnièrement fonctionnel.

Au sud de ce « confluent », la texture des éléments cités plus haut change : la « terrasse haute » devient lisse, les fines rides dunaires disparaissent et ce n'est plus que la dénivellation, rendue évidente grâce à la stéréoscopie, qui permet de la différencier de la vallée plus basse ; la bordure de la vallée (unité 3) présente une structure constituée d'éléments plus vastes, aux brillances plus contrastées ; les dunes sont moins escarpées et les bas-fonds sont plus grands ; l'orientation est moins nette.

Les données Landsat sous forme de composition colorée ne rendent guère compte de ces différents éléments et de leurs nuances. Par contre, elles restituent de nouvelles unités : les aires défrichées, très réfléchissantes, qui masquent peut-être les structures sous-jacentes.

Mises à part les « flammes » de l'axe central, la vallée paraît uniforme jusqu'à sa berge : la terrasse n'est pas distincte. La rive ne se distingue de la vallée que par des réflectances plus basses, sans qu'une texture soit distincte. Les nuances entre le sud et le nord du secteur n'apparaissent pas, non plus que la vallée du Dararey.

Mais si on replace le secteur géographique de Tabotakit dans un contexte plus large en juxtaposant les scènes 206-049 et 206-050, les vues du 19 février et du 26 mars 1976 (la proximité des dates permet une comparaison des unités), on constate que le secteur se trouve à proximité immédiate et en aval du confluent Azawagh - Azar : la « terrasse » (unité 2 de la figure 67) pourrait être constituée par les alluvions de l'Azar, recreusés ultérieurement par l'Azawagh après un remaniement éolien général qui aurait affecté l'ensemble du secteur. Il semble d'ailleurs que ces alluvions aient repoussé les écoulements récents (les « flammes ») sur la rive opposée.

d) Le secteur de Fabiji (feuille *Kirtachi*) d'après une photographie aérienne agrandie de la couverture 1955 à 1/50 000 et la vue du 26 mars 1976 scène 206-051 en composition colorée à 1/500 000 (cf. figure 80 hors-texte)

Ce secteur est situé sur le parallèle 12°50', sur la rive droite du Dallol Boso.

Le croquis d'interprétation ci-après précise le détail des unités de la vallée et de sa rive :

1. Plateau à couverture sableuse peu épaisse, cultivé sous parc à *Acacia albida,* unité de teinte gris moyen ;

2. Rebord du plateau, éboulis de blocs cuirassés et végétation buissonnante éparse ; teinte gris foncé ;

3. Accumulation sableuse de bas de pente, végétation herbacée et *Acacia albida,* pas de traces de cultures ; teinte gris moyen, identique à l'unité 1 ;

4. Vallée du Dallol Boso : sables partiellement couverts d'une végétation importante de *Acacia albida* et *Hyphaene thebaica,* très différenciables sur photographie aérienne ; quelques parcelles cultivées, visibles seulement grâce à leurs clôtures (1) ;

(1) Les champs sont clôs par des haies mortes de branchages épineux ou délimités par des touffes de *Andropogon gayanus* conservées sur les bordures. Ce sont ces clôtures et ces bordures qui sont visibles.

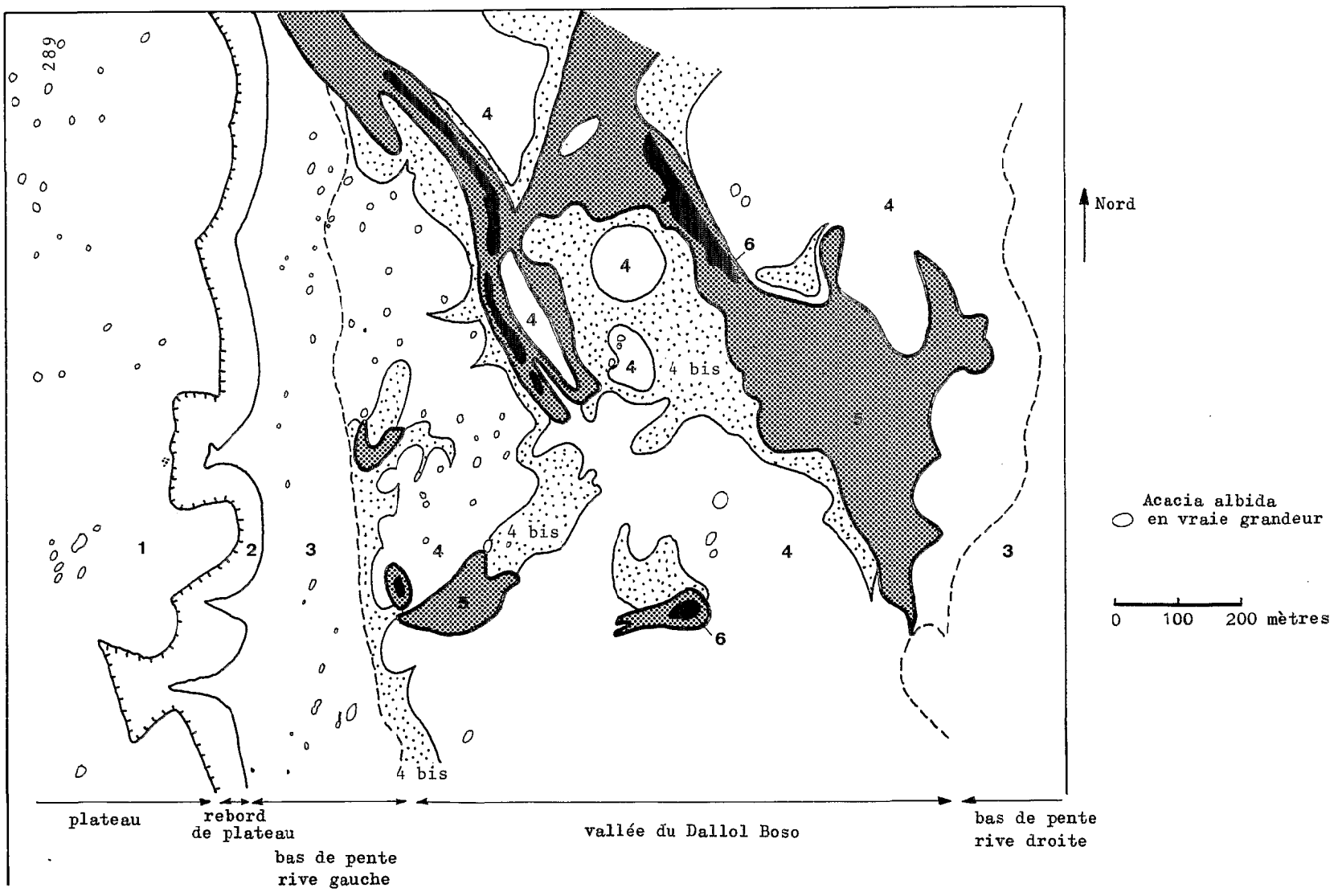


Figure 68 - Fabiji, croquis d'après photographie aérienne 55-56, agrandie

4 bis. Unité très semblable à 4 mais couverte d'une végétation très dense de *Hyphaene thebaica* jointifs ;

5. Aires argileuses occasionnellement inondables, portant jardins et rizières de décrue ; teinte gris sombre ;

6. Aires inondées chaque année, non cultivées (sols trop lourds), teinte gris très sombre.

Les unités 5 et 6 correspondent aux écoulements ou aux fonctionnements les plus récents, à la structure flammée rencontrée plus au nord, dont les contours se retrouvent ici, peu distincts sur le petit secteur figuré ici mais visibles sur la photographie aérienne dans son ensemble. Les unités 4 et 4 bis correspondent à des accumulations sableuses généralement considérées comme éoliennes ou éoliennes *et* fluviatiles après des remaniements successifs. La présence d'*Hyphaene thebaica,* qui colonise volontiers les sols pauvres, suggère une origine éolienne plutôt qu'une origine alluvionnaire.

Sur l'image Landsat, les champs dénudés et les chaumes sont marqués, sur le plateau et dans le Dallol, par une forte absorption dans le canal 4 seul. Un pointillé rouge (absorption dans le canal 5), ténu, marque *Acacia albida.* Le rebord de la falaise est matérialisé par un mince trait bleuâtre dont l'absorption dans le canal 7 signe les blocs cuirassés.

Les thèmes *aires inondées* (n° 6 dans la légende ci-dessus) et *aires occasionnellement inondables* (n° 5) sont très absorbants dans tous les canaux et notamment dans le canal 5, visibles en lignes fines et presque continues. Ils sont encadrés par une unité plus réflectante dans laquelle le canal 7 et le canal 5 restent accentués. Cette unité correspond aux deux thèmes de végétation dense (n° 4 et 4 bis) sans qu'il soit possible de les différencier sur composition colorée et à une partie du thème *aires occasionnellement inondables* (n° 5).

La comparaison entre les figurations de la photographie aérienne et de l'image Landsat suggère que le milieu s'est modifié. Les unités « inondables » à végétation dense et active et sol foncé ont maintenant un tracé rectiligne, étroit et continu qui implique l'existence d'un écoulement, au moins sur plusieurs kilomètres de longueur, ce qui n'existait pas dans les années 50... L'intensité du canal 7 dans les thèmes de végétation implique que celle-ci soit notablement constituée de feuillages non actifs ou de branches dénudées : il est possible que *Acacia albida* soit dénudé à la fin mars dans cette région méridionale proche de sa limite écologique et sur cette unité proche de la nappe phréatique... et il est possible que *Hyphaene thebaica* présente, à cause de son exploitation intensive, des caractères différents de ce qu'ils étaient autrefois. De façon générale, le fond du dallol semble présenter des indices d'humidité plus grande en mars 1976 qu'au moment de la prise de vue aérienne. Cette transformation, déjà visible sur la vue du 20 décembre 1973, peut avoir pour origine les pluviométries régulièrement élevées de la « décennie pluvieuse » (1955-1965, approximativement).

Nous avons utilisé les données Landsat pour une approche hydrographique des pays de l'Azawagh en faisant allusion à des cotes d'altitude, à la notion de dénivellation, au sens des écoulements... Dans toute étude hydrographique, la notion de pente, de relief ne saurait être négligée surtout lorsque ce relief est médiocre et que les pentes sont faibles... Or les données Landsat ne restituent le relief que très indirectement : le tracé et la structure des réseaux hydrographiques actuels ou récents permettent de s'en faire une idée quand il est accentué (massif de l'Aïr, massif d'Agalamlam, Ader) mais il n'en est rien quand le relief est faible. Les informations décisives nécessaires à la détermination de certains caractères des hydrographies anciennes, Landsat ne peut donc nous les livrer. Les données topographiques précises et la stéréoscopie sont alors indispensables à une étude fiable, mais il faut les chercher ailleurs que dans les données spatiales courantes actuellement : dans ce domaine, les données Spot peuvent être essentielles, à la fois par la plus grande résolution spatiale et par la stéréoscopie annoncée.

4. LA PRESENCE HUMAINE

La présence humaine est très inégalement perceptible sur les images Landsat des pays de l'Azawagh : sa visibilité varie avec le rapport entre l'effet de l'action humaine sur le milieu naturel et le paysage réellement naturel (ou spontané).

Dans la zone située au sud du parallèle 14°30' (la région des dallols) la présence humaine est intense : sur les plateaux elle se répartit dans des terroirs plus ou moins vastes, souvent largement espacés les uns des autres ; dans les grandes vallées, l'exploitation est plus dense, les terroirs sont continus.

Au fur et à mesure que l'on progresse vers le nord, la présence humaine se disperse : les villages sédentaires se font moins nombreux et plus distants les uns des autres, les nomades « remplissent les intervalles »... L'occupation et l'exploitation du territoire sont moins contrôlés : les voisins sont plus lointains ou ne sont pas présents en permanence ; les aires transformées par l'homme (les cultures, les jachères) tendent à s'étendre d'autant plus que l'incertitude des rendements est supposée compensée par la mise en culture de plus grandes surfaces... La zone marginale du monde agricole est aussi une zone pionnière où existent des terres libres, où les terroirs peuvent s'agrandir, où peuvent en être fondés de nouveaux en dépit des aléas climatiques... La population y est relativement nombreuse ; elle risque de « marquer » fortement un milieu fragile difficilement régénérable.

Au nord du parallèle 15°30' environ commence la zone nomade proprement dite, celle dans laquelle l'homme n'intervient pas directement sur le milieu ou bien où il n'intervient que très peu : ce sont ses troupeaux qui exploitent ce milieu sans le modifier fondamentalement de façon visible. Même si le milieu est dégradé, le paysage reste uniformément « naturel », il ne porte guère de marques d'activités volontaires, dirigées ni systématiques.

4.1. LES TERROIRS AGRICOLES

4.1.1. Les terroirs du sud sahélien

L'occupation humaine permanente et stable n'existe que dans le sud des pays de l'Azawagh, là où les ressources en eau de pluie et en sols (au sens pédologique) permettent une agriculture suffisamment rentable pour nourrir la population et garantir l'organisation sociale de l'espace agraire. La présence humaine est matérialisée sur le terrain par les villages, entourés de leur terroir disposé en auréoles concentriques.

Sur les images Landsat cette organisation est bien visible : les vues du 26 mars 1976 en composition colorée des scènes 206-050 et 206-051 et les vues du 28 décembre 1973 des mêmes scènes (canal 6 noir et blanc) montrent les villages sous la forme de points sombres entourés d'une auréole très claire, étoilée ou polygonale.

L'absorption élevée des aires d'habitat peut être due à la fois à la nature des toitures — paille sèche et terre nue (1) — et à celle des arbres d'ombrage qui poussent nombreux dans tous ces villages (2).

On a vu plus haut que les réflectances élevées de l'auréole qui entoure le village étaient celles des sables nus des champs permanents, dénudés ou peu couverts en saison sèche, jamais mis en jachère ; ils sont fumés par le stationnement des troupeaux qui broutent les chaumes.

---

(1) Jusqu'aux années soixante environ, les habitats consistaient en paillotes, cases rondes sans fenêtres à toit de paille cônique ; la *maison de banco* tend à les remplacer : bâtiment de terre crue rectangulaire avec portes et fenêtres, toiture plate recouverte de terre. Actuellement les deux formes d'habitat se rencontrent couramment dans tous les villages.

(2) L'arbre des villages est le *nim (Azadirachta indica)* à feuillage dense et à croissance rapide, introduit pendant la période coloniale et qui ne pousse pas spontanément.

Sur les vues de mars 1976, l'auréole plus lointaine des champs mis en culture et en jachère alternativement est visible par le pointillé clair (les champs) sur le fond sombre des parcelles en jachère ou des aires non cultivables ; jachère et « brousse » ne sont guère distinctes l'une de l'autre (cf. figure 80, hors-texte).

Dans les grandes vallées et sur leurs bordures immédiates l'organisation de l'espace telle qu'elle vient d'être décrite disparaît et on ne reconnaît plus la forme des auréoles. Les terroirs cultivés s'alignent en continuité sur les bordures des plateaux ; à l'extrême sud, l'occupation du sol par les cultures est plus longue (cinq à six mois), les jardins arrosés permanents et les arbres fruitiers sont nombreux, la canne à sucre apparaît. Les villages sont des hameaux, les « villages de culture » des gros bourgs (5 000 habitants et plus) eux-mêmes installés sur le rebord des plateaux. Les parcelles sont petites. La végétation « humanisée » (c'est-à-dire les plantes spontanées conservées ou favorisées parce qu'elles sont utiles) et la végétation «artificielle » (semée ou plantée volontairement et contrôlée) se confondent avec le milieu réellement spontané et il n'est plus guère possible de faire la différence entre l'intervention humaine et le milieu naturel sinon au moyen de données spatiales très précises et détaillées (les images numériques) et de données de terrain. Les peuplements de rôniers et de manguiers du Dallol Mawri n'ont pu être identifiés. En revanche, les parcs à *Acacia albida* du Dallol Boso sont perceptibles sous la forme d'un mouchetis léger, absorbant dans le canal 5 et contrastant avec le fond très brillant des champs nus. Il faut préciser que dans le Dallol Boso et plus précisément sur la terrasse supérieure, *Acacia albida* est développé en individus gigantesques aux couronnes larges de plusieurs dizaines de mètres (cf. croquis partiel du terroir de Fabiji, figure 68).

La ville de Dosso, est marquée (comme la plupart des aires urbaines sur les données Landsat en général) par un accroissement d'absorption dans le canal 7 qui lui donne une teinte gris ardoise sur les compositions colorées. Il en est de même, sur la scène voisine, pour la ville de Niamey. Les toitures de Dosso sont pourtant dans leur majorité semblables à celles des villages environnants (la tôle n'existe guère au Niger) et la ville est elle aussi très ombragée de grands arbres. Il faut peut-être voir là la réflectance des voies urbaines et un effet d'ombre plus accentué dans un milieu où les bâtiments sont très proches les uns des autres.

Les voies de communication sont peu distinctes : quelques alignements les rendent perceptibles. La route goudronnée qui relie Niamey à Dogondoutchi par Dosso et Birni n'Gaouré est presque invisible, peut-être seulement rendue perceptible par sa nouveauté: en 1976 elle était à peine achevée et les bas-côtés étaient encore largement dégagés. Il est à remarquer que les pistes de latérite sont souvent plus visibles sur les données Landsat que les routes construites : c'est que la circulation sur les pistes soulève des nuages de poussière qui se déposent largement de chaque côté sur la végétation, modifiant sa réflectance propre. Les pistes sableuses très fréquentées sont quelquefois rendues visibles par leur largeur : pour éviter l'enlisement, chaque véhicule prend garde de rouler à côté des traces précédentes et non pas dessus.

La route goudronnée, construite dans les années soixante, qui relie Dosso à Gaya n'est pas visible.

Les aires incendiées par les *feux de brousse* — réels ou supposés — posent un problème d'identification : cette pratique est connue dans la région des dallols mais les habitudes culturales ne font pas du feu un outil courant ; au demeurant, il est formellement interdit... Il peut cependant être utilisé pour faciliter la préparation et l'enrichissement des aires nouvellement défrichées : après abattage des arbres et arbustes, les souches, les petites branches, les feuilles desséchées sont brûlées sur place.

Les aires très sombres que l'on relève sur la scène 206-051 peuvent-elles correspondre à des feux de brousse récents ?

La comparaison entre la vue du 26 mars 1976 et celle du 28 décembre 1973 montre, entre le Dallol Boso et le Dallol Mawri, des aires très sombres aux mêmes emplacements mais aux contours légèrement différents, ce qui tend à exclure une origine entièrement naturelle ; mais il faut remarquer que la vue de décembre 1973 correspond à la plus grave période de sécheresse et donc que les faciès de la végétation naturelle ont pu différer sensiblement de ce qu'ils furent en 1976. On aurait plutôt là des variations végétales — en milieu naturel semble-t-il — et non pas trace d'incendie.

Le vaste polygone irrégulier qui se trouve sur la limite orientale de la même scène pose un autre problème : il présente des réflectances très basses et contient des nuances qui correspondent aux rebords des plateaux cuirassés et aux vallées, textures visibles dans le voisinage. Il présente aussi sur les deux vues une remarquable identité de contours. Ses dimensions et ses limites géométriques paraissent exclure l'incendie, même contrôlé ... Plantation d'arbres ? Territoire protégé excluant les défrichements et les cultures ? Ce secteur se trouve en Nigeria et il est impossible de se renseigner facilement à son sujet.

4.1.2. La zone agricole marginale

Si la plupart des aires cultivées des plateaux du sud sont si bien visibles sur les images Landsat c'est qu'elles forment un vif contraste avec les aires non défrichées et les jachères sur lesquelles la végétation spontanée est dense et couvrante ; en revanche, lorsque la végétation conservée ou cultivée est elle-même dense et couvrante, elle ne se distingue plus du milieu non humanisé.

Au fur et à mesure que l'on progresse vers le nord, la végétation spontanée se fait moins couvrante, elle se contracte et il devient difficile de la différencier des aires volontairement découvertes pour l'agriculture. Cette différenciation apparaît seulement si apparaissent des caractères *non naturels* (une disposition géométrique par exemple) dans le milieu perçu par Landsat. Seuls les contours « non naturels » des parcelles et des groupes de parcelles rendent nettement la différence radiométrique qui existe entre aires défrichées et cultivées et espaces restés dans l'état spontané.

Au nord du 15e parallèle apparaît une texture « mitée », vastes taches claires sur le fond dunes — bas-fonds des ergs anciens, rendues visibles davantage par la raideur de leurs contours que par le contraste de réflectance. Cette texture apparaît nettement sur la vue du 26 mars 1976, scène 206-050 avec une vaste extension des taches ; elle est absolument indistincte sur la vue du 28 décembre 1973 (canal 6 noir et blanc) et guère perceptible sur les photographies aériennes consultées : nous n'avons donc pas la certitude que ces taches claires correspondent réellement à des dénudations d'origine agricole. La saison et l'année de prise de vue jouent-elles un rôle dans leur mise en évidence ? On peut penser que ces dénudations ne sont pas perceptibles sur la vue de décembre 1973 parce qu'il n'y a pas eu de *champs* cette année-là : les semailles ont certes été faites entre juin et août sur des terrains préparés mais, faute de pluies suffisantes, le mil n'a poussé que d'une cinquantaine de centimètres sans donner d'épis (1) : aucune récolte n'a été faite et en décembre les troupeaux qui pâturent ordinairement les chaumes (hauts de plus de 1,50 mètres en année dite « normale ») avaient disparu ou se trouvaient plus au sud. Il n'y avait donc pas de différence radiométrique entre les *champs* proprement dits et les espaces non mis en culture.

Les photographies aériennes de 1975 montrent l'abondance de périmètres cultivés dans cette zone (secteur *Indika,* voir p. 190) qui apparaissent très clairs sur les clichés, bien contrastés avec leur voisinage non cultivé ; mais la taille des échantillons examinés n'a pas permis de vérifier si les formes et les surfaces des structures présumées dénudées étaient les mêmes en 1975 et en 1976, c'est-à-dire s'il y avait évolution ou non.

Au nord-est de Takanamat, dans la région située entre In Asaka et Taralesh Ralesh, l'image Landsat en composition colorée du 19 février 1976, scène 206-049 montre une vaste aire de « dénudation présumée », claire, géométrique, voisinant avec d'autres de moindre contraste. La composition colorée du 30 septembre 1978, même scène, montre qu'il y a concordance *relative* (mais pas absolue) entre les aires claires les moins nettes de la vue précédente et des aires nettement plus sombres que le voisinage, plus absorbantes dans le canal 5. En revanche, l'aire qui se présentait précédemment sous la forme la plus nette n'est plus distincte...

Nous proposons ici avec prudence une interprétation qu'il a été impossible de vérifier : les aires claires en saison sèche, puis sombres en saison des pluies pourraient être des champs cultivés : peu distincts de la

(1) Observation personnelle sur le terrain en octobre 1973.

couverture végétale spontanée en février car pas encore « nettoyés » pour les semailles ; couverts d'une végétation très dense, très couvrante à la fin du mois de septembre c'est-à-dire juste avant la récolte. Mais nombreuses sur la vue sont les aires à végétation absorbante dans le canal 5 particulièrement mais aussi dans les autres canaux : la végétation cultivée n'est certainement pas distincte formellement – sur compositions colorées tout au moins – de certaines formes de végétation spontanée.

L'aire la plus claire et la plus nette a disparu sur la vue de septembre : essai de défrichement non suivi ? Dégradation de type non agricole à caractère occasionnel ? On peut penser à une aire de surpâturage autour d'un forage mais ces aires sont plutôt de forme circulaire ou étoilée (Boudet et de Wispelaere, 1976).

Sur la vue de septembre 1978, le périmètre contrôlé du ranch d'embouche bovine d'Ekrafane est visible en partie : ce sont les voies d'entretien autour de la clôture qui sont seules discernables (et pas sur la totalité du périmètre) à l'intérieur et à l'extérieur du ranch, la végétation semble être la même.

Sur la même scène (206-049) et sur les vues de février 1976 et de septembre 1978, de vastes taches très sombres sont visibles. Malgré les vastes surfaces concernées (75 kilomètres carrés environ pour la plus petite), ces taches représentent vraisemblablement des feux récents : leur texture discontinue, leur réflectance basse, leur mobilité d'une vue à l'autre, paraissent le confirmer. La trace claire sur la vue du 30 septembre 1978 pourrait être celle d'un incendie ancien... On peut rapprocher cette tache claire, bien contrastée, de celle qui figure au sud de la scène sur la vue de février 1976. Si cette dernière figure la trace d'un feu (mais ce n'est pas prouvé), sa réflectance élevée, qui implique la dénudation, montre que l'herbe n'a pas repoussé sur cet emplacement en saison des pluies, infirmant la théorie (locale) qui veut que l'herbe repousse plus drue et plus verte sur les emplacements incendiés...

Notons que de tels incendies en zone nomade ne sont pas rares : ils sont souvent le fait de la négligence des bergers, ou du moins déclarés comme tels puisqu'ils sont formellement interdits.

Dans cette zone intermédiaire entre agriculture proprement dite et pastoralisme pur, les voies de communication ne sont pas visibles. Elles sont d'ailleurs fort peu nombreuses.

Les lieux habités, villages de cultivateurs ou d'éleveurs et centres administratifs, sont invisibles sur les compositions colorées, de même que les grands puits. Cette discrétion de la présence humaine, nous la retrouvons dans la zone nomade proprement dite.

4.2. LA PRESENCE HUMAINE DANS LA ZONE NORD SAHELIENNE

Au nord du parallèle 15°30', la présence humaine devient ténue et diffuse mis à part quelques centres à caractère urbain ; les nomades sont dispersés pendant la majeure partie de l'année par groupes de quelques dizaines de personnes. Leurs interventions ne se remarquent pas dans l'environnement naturel, sinon à l'échelle de l'observation directe : branches coupées (ce qui est rare), écorces et racines arrachées (1), restes de campements, piétinements autour des points d'eau... Aucune de ces actions, sauf peut-être le piétinement par le bétail, n'est susceptible d'être restituée au niveau de la tache élémentaire Landsat mais elles peuvent certes, par une intensité excessive, contribuer à modifier le paysage, à le dénuder ou à favoriser la croissance d'espèces particulières au détriment d'autres...

Nous ne nous sommes pas attachés dans cette étude à examiner comment la *désertification* peut être perçue au moyen des données Landsat : d'autres études sont en cours ou publiées à ce sujet (2).

La présence pastorale *normale* n'est donc pas aisément perceptible au moyen des données Landsat. On peut toutefois en chercher des traces indirectes.

C'est ainsi qu'un type de végétation bien particulier, rudéral et nitrophile, pousse sur les lieux où les hommes et le bétail ont stationné fréquemment ou longtemps (aussi bien en zone nomade qu'en zone

(1) Pour en faire des cordes dont l'économie nomade est très consommatrice : entraves, tendeurs et arrimages de tentes et de bâts et surtout cordes de puisage de l'eau.

(2) Boudet et de Wispelaere 1976, de Wispelaere 1980, Courel 1983, 1985.

sédentaire d'ailleurs) : ce sont les peuplements de *Calotropis procera (tirza* en Tamasheq) quasi exclusifs. On a donc cherché si des secteurs connus sur le terrain pour être revêtus de ce ligneux aux larges feuilles très vertes (1) étaient distincts de leur voisinage sur les images Landsat en composition colorée.

Le peuplement du barrage de Tigerwit (en partie planté, en partie spontané) est situé sur les argiles à réflectance basse dans le canal 5 : il n'est pas distinct de ces argiles. Celui d'Amelolud, sur les sables du plateau de la Tadarast en bordure d'une grande vallée boisée, n'est pas distinct non plus, mais ce sont peut-être justement les couvertures de *Calotropis procera,* fréquentes dans toutes les vallées de la Tadarast qui contribuent à la forte absorption radiométrique de certains secteurs élargis de ces vallées... Notons en outre que, ici aussi, il s'est écoulé plusieurs années entre le dernier enregistrement Landsat (1976 pour la scène 204-048) et les observations sur le terrain : les forêts de *tirza* n'étaient peut-être pas aussi développées en 1976 qu'elles l'ont été plus tard ou elles étaient dépourvues de feuilles (2).

Bien que *Calotropis procera* n'ait pas été identifié sur les compositions colorées à 1/500 000, il est probable qu'il peut l'être sur données numériques tant le faciès de la plante est différent de celui des autres ligneux (des *acacia* pour la plupart).

Les centres d'habitat concentré ne sont pas visibles comme tels dans la région d'Agadez : la plupart des bâtiments sont construits et recouverts de terre séchée *banco* qui a exactement le même aspect que les aires argileuses et argilo-sableuses piétinées qui les encadrent. La ville d'In Gall (entre 2 000 et 4 000 habitants) est seulement identifiable par les taches sombres de sa palmeraie et de ses jardins ; Tegidda n Tesemt (400 habitants) par la convergence des pistes marquées dans les argiles. Agadez (environ 25 000 habitants) est indistincte des sols nus, des rochers et des aires végétales qui l'entourent...

Les axes de communication ne sont visibles qu'exceptionnellement et seulement sur les argiles de l'Eghazer où ils se marquent par une absorption plus élevée due à la pulvérulence du sol et par leur largeur.

Paradoxalement, la piste la plus visible sur les données Landsat en composition colorée du bassin de l'Eghazer wan Agadez est celle qui relie Agadez à Marandet, peu fréquentée par les véhicules automobiles mais suivie en saison sèche par les milliers de chameaux de la « caravane du sel » (3). Cet axe est large et bien marqué par le piétinement. Cependant, sur la vue du 12 janvier 1976, il peut avoir été renforcé par le passage des véhicules du chantier de construction à Marandet. C'est le même phénomène, piétinement par les animaux et passage de véhicules, qui marque nettement la convergence des pistes au centre de laquelle se trouve le bourg de Tegidda n Tesemt.

Les grandes pistes trans-sahariennes qui traversent le bassin de l'Eghazer et relient Agadez à Tamanrasset d'une part, Tahoua et Zinder d'autre part, ne sont pas visibles sur les données Landsat, même dans leur traversée des argilites : peut être sont-elles trop étroites (?) dans les argiles et trop peu marquées dans les sables pour être prises en compte par la tache élémentaire Landsat ; la piste Agadez-Zinder est bien visible sur les données Spot, marquée en sombre sur le fond des aires argilo-sableuses. La route neuve et goudronnée qui remplace désormais la piste Tahoua-Arlit n'était pas construire en 1976 quoique les travaux aient été commencés : ils ne sont pas visibles sur image Landsat.

Les grands puits, points de concentration du bétail autour desquels le piétinement et la disparition de la végétation sont bien visibles sur photographies aériennes, ne sont pas visibles sur les images Landsat

---

(1) *Tirza* est fort peu exploité car les animaux ne le mangent pas (il est même réputé les empoisonner) et de l'avis même des populations locales « il ne sert à rien » : son bois est fragile et sans intérêt comme bois d'œuvre et il brûle sans dégager beaucoup de chaleur ; il n'a donc pas d'intérêt non plus comme bois de feu ; mais les populations Zarma du sud utilisent sa fumée comme antidote contre les méfaits de la sorcellerie.

(2) Observation faite en 1983 (E. Bernus) et en 1984 (Y. Poncet) : en décembre 1984, tous les peuplements de *Calotropis procera* rencontrés en Azawagh étaient volontairement défeuillés ou même abattus : mesure prise par les pasteurs pour empêcher le bétail affamé (il n'y a pas eu de pâturages herbacés cette année-là) de brouter ces feuilles dangereuses.

(3) La caravane du sel, l'*Azalaï*, relie Bilma aux villes hausa du sud par Marandet et Dakoro.

en composition colorée standard mais certains d'entre eux, notamment le forage de Tende, au milieu des argiles, sont perceptibles sur les images numériques par la structure radiante qui les entoure.

La présence de l'*homme pasteur* et de ses prolongements modernes (grands puits, axes de communication, villes) est donc extrêmement discrète sur les données Landsat. Il paraît alors difficile de rechercher dans les aires septentrionales des traces de dégradation du milieu qui soient d'origine péremptoirement anthropique : la réalité de cette dégradation peut certes être lue sur les données Landsat partout où elle est déjà connue ou présumée (1) ; il ne semble pas qu'elle puisse être identifiée grâce aux seules données Landsat en milieu mal connu ou peu décrit.

(1) C'est-à-dire aux alentours des grands puits (études de de Wispelaere sur le Ferlo) et des villes, sur les bordures des grandes routes aisément praticables ; ce dernier point parce que le bois de feu est transporté par des véhicules « à bout de souffle » et par ceux qui circulent occasionnellement « à vide » : le déboisement intensif *suit la route.*

Quatrième partie

UNE ÉTUDE DES PAYS DE L'AZAWAGH PAR TÉLÉDÉTECTION SPATIALE : BILAN ET CONCLUSIONS

L'étude qui précède ne prétend pas être complète ni couvrir la totalité des sujets susceptibles d'être étudiés par télédétection spatiale : certains aspects n'ont pas été traités ; des *objets* visibles sur image spatiale n'ont pas été étudiés en détail et quelquefois ils n'ont pas été formellement identifiés ; ailleurs, leur signification et leurs nuances n'ont pas été approfondies...

Cependant, la télédétection spatiale a constitué une source d'information sans laquelle l'étude des pays de l'Azawagh aux fins de prospection archéologique n'aurait pu être menée. Sur ce très vaste territoire peu décrit dans son ensemble jusqu'ici, elle a donné des informations homogènes et classables, adaptables selon nos besoins spécifiques.

Il convient maintenant de dresser le bilan des travaux, de s'interroger sur la fiabilité des résultats et, cette opération de télédétection étant dans une certaine mesure destinée à servir de *modèle,* il convient de s'interroger sur son caractère renouvelable.

1. LES LACUNES ET LES ANOMALIES

Les points obscurs de l'étude thématique sont dus à des confusions entre thèmes, qu'il n'a pas été possible de lever : nous en avons cité quelques-unes dans la partie thématique, on en trouvera d'autres sur la carte physiographique de l'Azawagh. Elles sont dues à l'impossibilité d'interpréter certains objets avec certitude ou de restreindre l'éventail d'interprétation.

Des confusions entre objets appartenant à des thèmes très différents ont été faites fréquemment au cours des travaux d'interprétation sur les images Landsat photographiques en composition colorée à 1/500 000. La plupart d'entre elles concernent les bas-fonds argileux de forme indifférenciée, les regs plus ou moins vernis, la végétation sur les plaines argileuses : l'image en composition colorée ne restitue pas de nuances de réflectance suffisamment fines pour que l'œil fasse aisément la différence entre des unités « un peu plus absorbantes » dans le canal 5 et des unités « un peu plus absorbantes » dans le canal 7... Si les argiles sont encadrées ou recouvertes par une végétation non active ou morte, l'absorption dans le canal 7 s'accentue ; si le reg est parsemé de minuscules plaques d'argile ou de sable, elles-mêmes abritant une végétation herbacée, son absorption dans le canal 5 s'accentue et les deux unités peuvent être confondues.

Leur *forme* ne suffit pas à différencier certaines unités pourtant fondamentalement différentes : les bas-fonds et les buttes de l'est du massif d'Agalamlam par exemple ont sensiblement la même au niveau de la résolution Landsat.

En fait, ce ne sont pas des *thèmes* qui sont ainsi confondus, mais des *unités géographiques* qui ne présentent pas d'éléments suffisamment discriminants hors la réflectance. Ces éléments discriminants peuvent être contenus dans leur voisinage : c'est ainsi que le relief des plateaux à regs introduit une unité *pente,* différente du reg et différente de l'unité voisine ; la pente peut être constituée de sables ou d'éboulis rocheux et présenter des faciès radiométriques différents des autres unités en raison des axes d'écoulement qui la parcourent. Dans le cas d'unités-*regs* suffisamment vastes pour que les unités *pente* se développent largement tout autour et soient visibles au niveau du groupe de pixels Landsat, la différenciation est aisée car les axes d'écoulement sont distincts, introduisant un *relief* indirectement visible.

Cependant, il peut arriver que les pentes elles-mêmes aient une réflectance proche d'un autre thème : c'est le cas des pentes très vernies de certains secteurs de l'Eghazer wan Agadez.

Quand les unités soumises à confusion sont très petites, le doute est difficile à lever car les pentes ne se développent guère en extension, pas suffisamment pour être perceptibles en tant qu'unités *différentes* sur une composition colorée à 1/500 000. Ce sont les données numériques qui permettent alors de lever la confusion par agrandissement de l'échelle et qui précisent les valeurs radiométriques ; mais au cours de l'opération d'interprétation des pays de l'Azawagh, c'est souvent la carte topographique à 1/200 000 qui a fourni les éléments de relief qui ont déterminé, indirectement, l'appartenance de certaines unités au thème *bas-fonds argileux* ou au thème *reg*.

Les unités composées de thèmes mixtes dans la tache élémentaire Landsat peuvent être facilement confondues avec des unités homogènes très différentes ou avec d'autres unités hétérogènes. Dans toute la moitié septentrionale, c'est le cas des unités à végétation contractée sur des formations sableuses ou argileuses, des unités à plaques de sable discontinues sur des formations rugueuses, des glacis ou des bas de pente d'extension réduite sur lesquels la végétation se dispose linéairement ou sur lesquels des épandages colluviaux recouvrent partiellement un substratum très différent, resté visible par endroits.

Dans les zones les plus septentrionales de l'Azawagh, cette hétérogénéité n'a pas de limites et accroît les risques de confusion et les incertitudes. Au sud, la discontinuité végétale au niveau de la tache élémentaire Landsat diminue ; les unités couvertes de végétation sont plus vastes ; surtout, elles ne sont plus linéaires ; le sol reste inégalement couvert mais les unités homogènes grandissent suffisamment pour couvrir un ensemble de taches élémentaires. Les risques de confusion diminuent alors car les réflectances caractéristiques de la végétation et la texture des unités permettent de ne pas les confondre avec des unités non végétales ; si le risque de confusion entre thèmes subsiste, c'est entre thèmes relativement voisins appartenant à la même famille : l'ensemble *végétation* ou l'ensemble *formations de surface dénudées*. Chaque fois que le risque de confusion intervient dans les thèmes de végétation, l'utilisation d'une image de saison des pluies, pendant laquelle l'activité chlorophyllienne est intense lève le doute.

L'ennuagement partiel est aussi apparu comme une source de confusion : dans la région de Tillia, des unités très réfléchissantes, gypseuses, juxtaposées à des unités très absorbantes (bas-fonds argileux ou buttes caillouteuses) peuvent être confondues avec des nuages et leur ombre. L'examen d'une seconde vue sur le même secteur lève le doute en séparant les unités stables des unités « fugitives »...

Un certain nombre d'*unités* relevées sur les images Landsat n'ont pu être identifiées avec certitude, pour plusieurs raisons :

— les caractéristiques radiométriques ne se rapprochent d'aucune unité identifiée ;

— les unités concernées sont visibles seulement sur les images Landsat : aucune autre source ne confirme leur existence ni n'en donne le contexte ;

— les unités ressortissent à des thèmes mixtes qu'une composition colorée à 1/500 000 ne restitue pas dans le détail : nous retrouvons le problème des confusions entre thèmes cité plus haut, à ceci près qu'il n'y a plus ici de choix entre deux interprétations mais impossibilité de classer les unités en question.

Des linéaments de plusieurs centaines de kilomètres de longueur traversent certaines images (notamment la vue du 19/02/76 de la scène 206-049). Leur rectilinéarité ne paraît explicable, dans le contexte général des milieux naturels régionaux, que par une origine tectonique que les informations disponibles par ailleurs n'infirment ni ne confirment formellement ; on peut les rapprocher de linéaments visibles sur image Météosat (cf. p. 107). Peuvent-ils représenter, généralisée par la définition Landsat, la trace d'un erg très ancien ? ou bien constituer un phénomène complexe que nous n'aurions pas su identifier, intégrant relief, sols, végétation et que certaines photographies aériennes restituent à plus grande échelle (cf. les secteurs de Dinkildimi et Indika, p. 173 et p. 190) ? Une étude très détaillée au pixel près sur les données numériques et des observations de terrain assorties d'enquêtes auprès des populations locales sur les facteurs de modification des « teintes » du paysage permettraient peut-être de donner des éléments d'explication à ces étrangetés.

Les unités à basse réflectance que nous avons qualifiées d'aires incendiées posent un autre problème : malgré leur mobilité et les variations de leurs contours, elles présentent d'une vue à l'autre les mêmes caractéristiques radiométriques. Ce sont ces caractéristiques, connues par ailleurs grâce aux interprétations effectuées dans des zones plus méridionales où les feux de brousse sont courants -- Cameroun, Bénin, Centrafrique — qui font penser à une origine identique. Mais rien ne confirme cette interprétation, ni les dimensions des unités, ni les enquêtes : des incendies couvrant de telles surfaces n'auraient-ils pas pris des allures de catastrophe et n'auraient-ils pas alimenté la riche chronique orale des événements locaux ? Il est possible qu'une étude au pixel près, comparée éventuellement à celle d'une unité connue sans erreur comme étant celle d'une aire incendiée, donne des éléments décisifs d'information.

La succession des enregistrements Landsat n'a pas permis de faire une réelle étude multitemporelle sur l'ensemble des pays de l'Azawagh : certaines vues présentent certes quelques termes d'évolution des éléments végétaux ou hydrographiques ici et là (notamment dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez) mais il n'a pas été possible d'étudier véritablement l'évolution de tel ou tel phénomène à terme fixé.

Néanmoins, l'étude de plusieurs vues sur la même scène affine l'interprétation des unités ou les délimite avec une plus grande précision même si les vues sont toutes enregistrées au cours de la même saison. La précision et l'aisance d'interprétation sont accrues quand on peut travailler sur une vue de saison sèche et sur une vue de saison des pluies : les résultats sont particulièrement intéressants dans les thèmes végétaux et encore davantage dans les thèmes hydrographiques.

L'impossibilité de faire une étude multitemporelle *régulière* ou *continue* avec les données Landsat disponibles empêche d'évaluer l'impact de la présence humaine dans la région et les effets d'une modification des conditions climatiques depuis plus de dix ans. Des informations utiles mais partielles peuvent être trouvées sur les données Météosat, mais à l'échelle continentale. Il ne semble pas cependant que leur résolution spatiale permette de déceler les détails qui révèlent la désertification, laquelle n'est pas toujours un phénomène spectaculaire ; la résolution des données Landsat ne permet guère non plus d'en déceler les indices ténus. Celles des satellites de seconde génération (Spot, Thematic mapper) apporteront sans doute sur le sujet des informations très utiles.

Ce sont les données du satellite Landsat qui ont révélé certains aspects de l'originalité du bassin de l'Eghazer wan Agadez en tant que *Région* au sens propre. Le recueil des traditions orales sur les événements historiques et les liens culturels et commerciaux, révélés ou confirmés par les découvertes archéologiques, les vestiges des peuplements anciens et les recherches linguistiques sur leurs origines et leurs déplacements ont donné d'autres éléments et l'ensemble des travaux fait apparaître le bassin de l'Eghazer comme une région cohérente, présentant de nombreux traits de continuité depuis le Néolithique jusqu'à nos jours. A la vérité, les peuplements, les genres de vie, les faciès culturels et leurs évolutions ont autant de part que les traits du milieu naturel dans l'identification régionale bien que dans ce milieu à tendance sèche et même aride, les contraintes du milieu naturel pèsent lourdement de nos jours sur les activités.

Pour cette raison, nous n'avons pas proposé de découpage régional à l'issue de cette étude des milieux naturels. Des découpages régionaux des pays de l'Azawagh, fondés principalement sur les ressources pluviométriques, les ensembles naturels et les limites administratives, existent déjà et correspondent bien à une réalité actuelle, mais purement géographique (Bernus, Fauck, Peyre de Fabrègues, 1983, entre autres). Mis à part le bassin de l'Eghazer et la région des Dallols, ce qu'on sait de leur histoire et de leur préhistoire ne permet pas encore d'y discerner les traits d'une continuité ou des variations d'influences et de foyers...

Les données de télédétection spatiale montrent la surface de la Terre sous une forme qui est une *transcription* plutôt qu'une image complète. La distorsion entre transcription et réalité est due à des facteurs multiples qui appartiennent les uns aux caractères spécifiques du satellite et de ses capteurs (résolution spatiale, bandes spectrales), les autres aux caractères spécifiques, permanents ou occasionnels de la période d'enregistrement, du volume atmosphérique, de l'ensoleillement et du territoire : nature des terrains, état et abondance de la couverture végétale, etc...

Si la correspondance peut être établie avec une grande précision entre la réalité du territoire et sa représentation dès lors qu'on connaît parfaitement l'ensemble de ces facteurs, il est beaucoup plus difficile de l'établir de manière fiable, exploitable et extrapolable quand plusieurs d'entre eux manquent.

Or les milieux « mal connus et peu décrits » sont précisément malaisément connaissables et descriptibles : l'information thématique et la localisation sont imprécises, non homogènes, rarement classées ; l'accès au terrain est coûteux, jamais rapide, quelquefois même impossible... Pourtant, leur approche géographique et leur cartographie impliquent que soient connus :

— la nature, la disposition, l'état des plus petits éléments constituant le paysage (végétation, bâtiments, aires dénudées, par exemple...),
— la disposition relative des *unités* constituées par les groupes d'éléments,
— l'organisation de ces unités.

Les cartes existantes, les photographies aériennes, les observations du terrain offrent partiellement cette information nécessaire. Les données de télédétection spatiale apportent-elles une information exploitable, réellement complémentaire ou même essentielle ? Comment toutes ces sources d'information peuvent-elles s'associer pour contribuer à une meilleure connaissance du territoire ?

2. LES RAPPORTS DES DONNEES DE TELEDETECTION SPATIALE AUX AUTRES REPRESENTATIONS DU TERRITOIRE

2.1. LE RAPPORT AUX CARTES EXISTANTES

On a vu que les cartes existantes, topographiques et thématiques, bien qu'elles aient été adaptées à une demande lors de leur fabrication, ne donnent pas du territoire étudié une image *homogène* ni ne présentent une taxonomie systématiquement et directement utilisable.

Les données Météosat, canal visible, ont livré une information parfaitement homogène puisque les pays de l'Azawagh tout entiers sont contenus dans une seule image. Les échelles lisibles des données photographiques et des données numériques, qui vont de 1/10 000 000 environ à 1/3 000 000 environ, sont voisines de celles des cartes thématiques générales : carte géologique, carte des pâturages à 1/2 000 000 et de la carte topographique à 1/1 000 000 qui ont pour sources des études de terrain très précises et des données de télédétection aérienne à 1/50 000 environ. Les données Météosat ne peuvent restituer un grand nombre d'unités thématiques sans une interprétation très affinée : les détails sont gommés par rapport à la figuration présentée dans ces documents.

Par contre, des classements nouveaux apparaissent : des « objets » non connus jusqu'ici, qui ne figurent pas dans le corpus d'informations disponible et un thème nouveau : l'albedo. Il est certain que les valeurs d'albedo apportent une information très utile, à la fois pour la délimitation de certaines unités de paysage et pour l'étude de phénomènes régionaux et pluri-régionaux ; on pressent son rôle dans la température des masses d'air et par conséquent dans l'établissement de la mousson et la disposition des lignes de grains au cours de la saison des pluies, c'est-à-dire dans la pluviométrie locale ; par ailleurs, il montre que les contours de certaines unités géographiques connues peuvent être redessinés, offrant une carte différente de celles auxquelles nous sommes accoutumés : le *massif de l'Aïr* par exemple n'est plus identifié par des figurations conventionnelles, courbes de niveau ou teintes spécifiques, il se caractérise, avec des contours différents, par le contraste d'albedo de ses roches nues et de ses éboulis avec les nappes de sable du voisinage. Il en est de même des plateaux du Continental terminal (Ader, Agalamlam, entre autres) dont la disposition dans l'ensemble du bassin des Iullemmeden, généralisée par la résolution Météosat est plus nettement perceptible que sur les cartes. De la même façon, c'est sur les données Météosat que l'ori-

ginalité du bassin des argilites de l'Eghazer wan Agadez est mise en évidence, par le contraste entre son albédo réduit et l'albédo élevé des sables qui l'entourent : l'information spatiale restitue les contours géologiques déjà connus par les cartes (qui les figurent avec davantage de précision) mais il offre en même temps un classement nouveau, différenciant les *argilites de l'Eghazer* de toutes les formations géologiques voisines.

Enfin, aux tracés figés des cartes, les données Météosat opposent, grâce à la répétitivité vraie des enregistrements, la figuration véritablement cinétique de thèmes évolutifs : la végétation, l'hydrologie par exemple.

Ces nouveautés ont été peu explicitées ici car nous n'avons utilisé que les données photographiques du canal visible ; il n'est pas douteux qu'une étude plus fine et plus complète sur données numériques associant le canal infrarouge thermique fasse apparaître de nombreuses informations utiles.

L'échelle et la précision des informations contenues dans les *données Landsat* permettent de les comparer aux cartes thématiques d'inventaire détaillé aux fins d'aménagement du territoire et de planification, dont les échelles sont situées entre 1/50 000 et 1/500 000 et aux cartes topographiques à 1/200 000.

La taille de la tache élémentaire n'entraîne guère de défaut de précision relativement aux cartes en question : dans les deux cas, on a une généralisation des contours : reste à savoir si la comparaison serait favorable à Landsat si on juxtaposait ses données aux minutes des cartes citées ci-dessus, qui sont rédigées le plus souvent à 1/50 000 et qui sont plus détaillées, dans leur tracé, que leur produit publié.

L'exploitation des données Landsat aurait pu donner l'occasion de comparer les faciès radiométriques de certaines unités cartographiées, donc thématiquement connues, avec les faciès radiométriques d'unités situées dans les régions non cartographiées. Cette tentative d'extrapolation n'a pu être menée très loin car les cartes thématiques disponibles ont une extension géographique *zonale* au sens *zone climatique* et il aurait été imprudent de rapprocher les caractères radiométriques de territoires situés dans des zones différentes. Néanmoins, on a remarqué que si le contenu des cartes géologiques et pédologiques actuellement disponibles ne peut guère être complété ou infirmé (1) par un examen superficiel des données Landsat, c'est le contenu de leurs *notices* qui peut utilement être précisé par une interprétation. En effet, ces notices font état de différences lithologiques ou physico-chimiques non restituées sur les cartes et non classées : l'image Landsat permet de repérer ces nuances et, à défaut d'en fournir une explication, de les localiser. C'est dans le domaine des formations quaternaires, si médiocrement figurées sur les cartes thématiques, que les données Landsat apportent le plus d'informations : par la différenciation de la radiométrie et de l'arrangement des pixels dans les unités *erg,* par la différenciation des alluvions fluviatiles, par la mise en évidence des vernis superficiels.

Enfin, même si toutes leurs nuances n'ont pas été interprétées, les données Landsat ont montré la variété des caractéristiques radiométriques relatives à la végétation et, dans certains cas, la complexité des imbrications entre des unités dont le contenu végétal est très différent. Les cartes de végétation actuelles ne restituent guère ce type d'information, pas plus que les cartes topographiques, très généralisées sur ce plan, même à 1/200 000. En revanche, les données Landsat paraissent très inférieures aux cartes topographiques pour rendre compte des détails de la présence et des activités humaines, aux mises à jour près.

Citons enfin que les données Landsat nous ont permis de faire des corrections d'ordre *topographique* sur les cartes topographiques du bassin de l'Eghazer wan Agadez.

Les données de la simulation Spot concernent un territoire d'extension trop limitée pour qu'elles soient comparées aux cartographies existantes ; notons qu'elles proposent beaucoup plus de détails que les cartes topographiques à 1/200 000.

---

(1) Les cartes géologiques ont été dressées par des équipes nombreuses, pourvues de moyens importants et d'une bonne expérience du territoire, au terme d'études de terrain très attentives. Elles représentent la « classe supérieure » des cartes thématiques sur les pays de l'Azawagh et sur l'Afrique de l'Ouest toute entière par leur précision et les surfaces couvertes.

2.2. LE RAPPORT AUX PHOTOGRAPHIES AERIENNES

Les photographies aériennes sont des sources comparables aux images de télédétection spatiale puisque les unes et les autres donnent une information complète, homogène et non classée sur le paysage. Cependant, les échelles utilisables des données photographiques de Météosat et de Landsat diffèrent sensiblement des échelles courantes des photographies aériennes (ici 1/50 000 à 1/70 000), de même que les résolutions au sol sont très différentes.

S'il est vrai que la séparation des données de télédétection en bandes spectrales permet de bien *percevoir* certaines unités (la végétation notamment) c'est l'identification précise de chacun des objets qui constituent ces unités qui permet de les *définir* : en cela, les photographies aériennes sont irremplaçables (grâce à la lecture stéréoscopique en particulier) puisqu'elles identifient chaque objet du paysage (arbre, bâtiment, champ...) et souvent précisent davantage encore (espèce végétale, destination du bâtiment, mode de culture...), informant ainsi sur la nature et les proportions de chacune des composantes de l'unité. Mais sur de vastes surfaces et lorsqu'il faut en dépouiller rapidement un grand nombre, elles sont moins utiles que les données Landsat pour délimiter les contours de chaque unité, encore moins pour localiser tel thème ailleurs dans le territoire.

Les données Landsat sont incapables de restituer les composantes d'une unité hétérogène et même de fournir directement et à coup sûr la nature d'une unité homogène ; elles ont donné en revanche, presque instantanément, les localisations et les contours des unités géographiques ; les deux sources d'information se complètent absolument. Mais Landsat a largement dépassé les photographies aériennes dans la restitution des phénomènes dynamiques : d'une part parce que toutes les vues Landsat étaient plus récentes que les vastes couvertures aériennes systématiques ; d'autre part parce qu'une répétitivité même partielle a permis de comparer les mêmes unités dans divers états d'évolution ; enfin parce que la séparation en bandes spectrales différentes a permis de restituer de façon exceptionnelle les unités végétales.

Les données de la simulation Spot se rapprochent des photographies aériennes par leur échelle de restitution photographique bien que la résolution au sol reste sans commune mesure (20 mètres contre — théoriquement — quelques centimètres) et que la simulation ne fournisse pas de données stéréoscopiques...

A l'intérieur de la tache élémentaire de Spot les objets différents n'apparaissent pas et au-dessus d'un certain niveau d'hétérogénéité des éléments du paysage, c'est la photographie aérienne qui donne les éléments d'interprétation et elle seule. Mais les données de simulation Spot restituent les grandes lignes structurales du paysage avec une généralisation légère. Cette généralisation *légère* peut être un facteur positif car elle gomme les détails pour faire apparaître certains caractères essentiels et la séparation en bandes spectrales peut, comme dans le cas de Landsat, fournir des informations absentes de la photographie aérienne.

Alors que les données Landsat fournissent de la Terre une image qui n'a qu'un rapport relativement lointain avec celle des photographies aériennes, les données Spot en sont nettement plus proches et probablement concurrentes. Elles le seront certainement davantage lorsque le satellite Spot sera opérationnel et fournira des informations stéréoscopiques.

Il ne semble pas douteux qu'en ce qui concerne l'aisance d'interprétation et le rapport spontané que l'œil et le cerveau entretiennent avec la réalité du paysage, les photographies aériennes soient privilégiées. Par contre, leur utilisateur est handicapé par les faibles surfaces couvertes à l'unité et peut-être par le niveau de détails. Notons toutefois que semblent se généraliser des prises de vue aériennes panchromatiques au 1/100 000 que nous n'avons pas eu l'occasion de comparer aux données spatiales parce qu'elles n'existent pas sur la région.

Il semble donc bien que l'image objet par objet du territoire que donnent les photographies aériennes soit indispensable à une étude en milieu encore mal connu : dans de nombreux cas, elle complète, sans le remplacer, le travail sur le terrain lui-même.

2.3. LE RAPPORT AU TERRAIN

La plus directe, la moins « médiatisée », la plus détaillée des représentations de la Terre est celle du *terrain* proprement dit tel qu'il se présente à l'observateur. Aucune image ne peut évidemment rivaliser avec les informations qu'il livre sur les éléments visibles de la surface et sur les éléments invisibles de subsurface, puisque ceux-ci concourent également à la description et à l'analyse des unités géographiques.

L'étude d'un milieu mal connu au moyen des données de terrain et au moyen des données de télédétection peut apparaître comme paradoxale : les secondes semblent permettre de se passer du premier en fournissant, à diverses échelles et sous divers formats et bandes spectrales, des figurations de la surface de la Terre ; mais aucune des données de télédétection (aérienne ou spatiale) ne peut se passer d'une interprétation au moyen des observations au sol.

Une partie des pays de l'Azawagh (le bassin de l'Eghazer wan Agadez et, dans une certaine mesure, la région des dallols) a été traitée par interprétation des données Landsat avec une connaissance du terrain et des observations sur place ; l'autre partie (l'Azawagh central) a été traitée sans connaissance du terrain. Il n'est pas douteux que la précision, la finesse et la fiabilité des résultats traduisent cette différence ; mieux même : l'étude du bassin de l'Eghazer wan Agadez, pourtant considérée comme la plus complète et la plus raisonnée des études que nous avons faites sur l'Azawagh, ne nous paraît pas avoir été menée assez loin *sur le terrain* pour que les résultats d'interprétation des données Landsat soient véritablement complets dans le cadre de notre propos : c'est l'exploitation des données Landsat qui met en évidence les lacunes d'analyse du terrain. Il est vrai que la région a subi une évolution particulièrement complexe et que les formations et les formes, jamais décrites ni cartographiées dans leur ensemble, y présentent des caractères obscurs... Une étude géomorphologique proprement dite aurait sans doute permis d'éclaircir la nature et la genèse de certaines formations de surface et par conséquent d'effectuer une interprétation plus complète et plus fiable des données Landsat.

Les observations de terrain (1) ont restitué la densité, la couleur, l'organisation de chacun des éléments du paysage au niveau de la tache élémentaire Landsat ; elles ont aussi restitué les facteurs susceptibles d'avoir modifié ces éléments au moment de l'enregistrement : piétinement par le bétail, luisance des surfaces lisses, dessèchement des herbes, voiles sableux... Cette connaissance a pu être extrapolée ailleurs que sur les lieux mêmes d'observation à des unités présumées semblables parce qu'elles présentaient des caractéristiques radiométriques voisines : même si l'extrapolation n'a pas été totale, les facteurs de modification des caractéristiques radiométriques, leurs effets et leurs limites restent présents dans le catalogue mental de l'interprète.

La connaissance très précise des facteurs de modification géographique et radiométrique a été essentielle pour l'interprétation des données spatiales : puisqu'on ne peut isoler sur l'image les *objets* à caractère dynamique ou mobile des objets fixes dans l'espace et dans le temps, il est absolument nécessaire de savoir quelles modifications peut subir l'ensemble des objets contenus dans la tache élémentaire. C'est la raison pour laquelle nous avons attaché autant d'importance aux variations pluviométriques, génératrices de modifications peut-être mineures dans le paysage, importantes au niveau de l'interprétation des images Landsat.

D'autre part, l'observation sur le terrain des unités qui présentent les mêmes caractéristiques radiométriques (valeur, texture) et celle du type de contact avec les unités voisines restitue leur organisation relative, ses détails et sa dynamique et permet ainsi à l'interprète de comprendre l'articulation générale du paysage : constituants, processus de mise en place, interactions ... Réciproquement, la lecture instantanée, sur le document de télédétection, de la disposition et de l'extension des unités formant l'ensemble d'un territoire fournit des informations irremplaçables.

Enfin, en territoire mal connu et peu décrit, c'est le terrain seul qui donne les éléments de validation des nombreuses hypothèses de travail suscitées par l'examen des données spatiales sur le milieu, ses dynamiques et les interactions qui s'y manifestent.

---

(1) Le terme *observations* comprend non seulement l'observation de la surface mais aussi les enquêtes, les dénombrements et mesures, les identifications botaniques....

2.4. LES RAPPORTS DES DONNEES SPATIALES ENTRE ELLES

Les données spatiales qui ont été exploitées ont des caractéristiques différentes : taille de la tache élémentaire, taille de la scène, caractéristiques des bandes spectrales, fréquence d'enregistrement du même territoire, répétitivité réelle (1)... Dans l'étude des pays de l'Azawagh, ces qualifications se sont complétées sans se concurrencer.

L'intérêt de Météosat est qu'il présente de façon absolument homogène de très vastes espaces et permet dans une certaine mesure de « caler » les réflectances des multiples scènes Landsat. Un autre grand intérêt réside dans sa répétitivité réelle, qui permet de disposer presque à coup sûr d'images correspondant aux *périodes* (sinon aux *dates*) utiles.

Les détails sont certes peu abondants, à la fois au niveau géographique et au niveau thématique ; mais dans une étude régionale ou pluri-régionale en milieu mal connu et peu décrit, Météosat est susceptible d'apporter des informations fondamentales sur les phénomènes de grande extension géographique à évolution rapide (les déplacements de la *ligne verte* par exemple au cours des saisons et des années) et même de révéler des phénomènes nouveaux... Il restitue, autour du territoire étudié, l'environnement à échelle continentale qu'il est souvent indispensable de prendre en compte.

Il semble qu'une utilisation efficace des données Météosat passe par l'exploitation des données numériques, plus détaillées et plus précises que les données photographiques, et par une combinaison des données du canal « infrarouge thermique » et du canal « visible ». A petite échelle et à l'aide de l'information disponible (les cartes topographiques et thématiques) les données numériques constituent une transition avec les données photographiques Landsat.

La résolution au sol et le périmètre des scènes Landsat en font un « outil d'exploration » approprié à l'étude des vastes territoires peu décrits jusqu'ici. Dans les pays de l'Azawagh, la résolution au sol des données Landsat et la transcription photographique du réseau des pixels (2) offrent une finesse suffisante pour que soient distinguées des *unités géographiques* différentes.

La définition des images spatiales n'est pas suffisante, certes, pour que ces unités soient aisément déterminées et interprétées ; cependant, les données Landsat sous forme photographique livrent une information classable généralement plus satisfaisante que celle des documents rédigés et cartographiés couramment disponibles actuellement sur ces territoires. Dans certains cas, l'exploitation des données numériques d'une part, celle de données photographiques enregistrées à des dates diverses d'autre part, livrent des informations complémentaires qui contribuent à relever le seuil de connaissance des unités révélées. L'absence relative de détails oblige à aller du général au particulier, démarche utile et efficace qui révèle les grands traits de l'ensemble régional et pluri-régional.

Les données spatiales contribuent à résoudre le problème de la *classification* des unités de territoire : en milieu mal connu et peu décrit, géographiquement très étendu, il est indispensable de disposer d'une information rudimentaire mais homogène pour fixer les limites taxonomiques qui serviront à dresser une cartographie. Cette information doit être assez générale pour donner une idée de l'*ensemble* de la taxonomie, assez complète pour que rien d'important ne soit omis. Les données Landsat en fournissent des éléments : quelle que soit la *nature précise* des unités, la variété des arrangements radiométriques permet d'orienter le nombre et le choix des classes. Dans l'étude des pays de l'Azawagh, compte-tenu de la surface à couvrir et du niveau de détail à obtenir, les données Landsat ont été particulièrement efficaces ; en revanche, les données Spot ont restitué trop de détails pour qu'une *classification générale préalable* soit aisée tandis que les données Météosat restituent des classes déjà connues.

---

(1) Voir en annexe 2.

(2) Rappelons que sur les données photographiques Landsat issues de négatifs de l'U.S.G.S., chaque pixel n'est pas distinct en tant que tel.

Les données Spot peuvent, comme les photographies aériennes, fournir des informations contribuant à l'interprétation des données Landsat : la future répétitivité de Spot donnerait en particulier des informations permettant de préciser le mode de restitution par Landsat de phénomènes évolutifs. Actuellement, les photographies aériennes *récentes* ou prises à des dates *utiles* ne sont pas nombreuses sur les pays de l'Azawagh : les données Spot les remplaceraient pour effectuer sur *échantillons* l'étude de zones précises, celles qui connaissent une évolution rapide (de leur végétation par exemple) : pourtours urbains, grandes vallées du nord.

Les données Météosat confirment et, dans une certaine mesure, reclassent et précisent des informations générales déjà obtenues et que l'on peut considérer comme fiables. Elles ne font pas l'objet d'une interprétation à proprement parler puisque les objets restitués sur l'image sont déjà identifiés auparavant...

Les données Spot, comme les données Landsat, doivent faire l'objet d'une *interprétation* au sens propre, c'est-à-dire d'une lecture transposant les éléments de l'image à ceux du paysage, traduisant la valeur radiométrique et la disposition des pixels en objets constitutifs du paysage. C'est justement cette traduction qui est délicate puisque, en milieu mal connu et peu décrit, nous n'avons pour le faire et par définition, que fort peu de clefs, fort peu de « *signatures spectrales* » sur lesquelles nous appuyer. On ne peut que proposer les photographies aériennes et les observations de terrain pour déterminer ces clefs. La précision de Spot et sa stéréoscopie future ne semblent pas nous affranchir des moyens *classiques* d'investigation d'un territoire, au contraire : cette précision semble même être un handicap dans certains cas pour l'interprétation car en milieu fortement hétérogène, comme les zones semi-arides, la résolution Spot se trouve à mi-chemin entre l'objet et l'ensemble d'objets : le pixel Spot ne généralise pas dans tous les cas alors qu'on est assuré que le pixel Landsat le fait.

Par ailleurs, les dimensions de la scène Spot (60 sur 60 kilomètres dans les conditions opérationnelles prévues) paraissent en limiter l'usage à des territoires d'extension relativement réduite : sur les pays de l'Azawagh, il faudrait une cinquantaine de scènes sans stéréoscopie, le double avec stéréoscopie, pour couvrir le périmètre que nous nous sommes donné : le rapport entre l'effort nécessaire à l'interprétation (qui, rappelons-le, n'épargne ni l'usage des photographies aériennes ni les observations sur le terrain) et le volume des données à traiter paraît défavorable à une utilisation semblable à celle que nous avons faite des données Landsat. Mais la nécessité de l'interprétation ne devrait pas obérer le rôle d'échantillon que peuvent tenir les données Spot, tout autant que les photographies aériennes.

3. POUR UNE UTILISATION ULTERIEURE DES RESULTATS : FIABILITE ET RENOUVELLEMENT

Pour la première fois, l'ensemble pluri-régional des pays de l'Azawagh a fait l'objet d'une cartographie globale qui corrige et met à jour des thèmes connus certes, mais aussi apporte des informations cohérentes, localisées et intégrées, sur plusieurs familles de thèmes.

On aura noté que la restitution cartographique sur le bassin de l'Eghazer wan Agadez (1) est plus abondante et plus complète que sur les autres régions de l'Azawagh parce que le plan de publication impliquait une cartographie de ce territoire qui intègre les connaissances géographiques et les connaissances archéologiques acquises au cours des travaux et aussi parce que l'étude a mobilisé davantage de personnes sur le terrain pendant davantage de temps...

Néanmoins, ces cartes présentent-elles une précision et une exactitude satisfaisantes ?

---

(1) Poncet et al. 1983, Atlas : les planches *Géomorphologie et structure* et *Végétation* ; Bernus, Bernus et Poncet, 1984, la carte hors-texte *Hydrographie et Végétation.*

Le but des travaux était de dresser un tableau géographique des éléments intéressant la recherche archéologique afin d'orienter et de justifier les prospections sur le terrain puis de présenter le contexte paléo-géographique et géographique des sites découverts en proposant des éléments d'explication à leur répartition et à leur typologie.

En cela, les travaux géographiques effectués par télédétection Landsat sont satisfaisants : s'ils n'ont pas toujours aidé à la prospection parce qu'ils se sont, pour la plupart, déroulés pendant ou après celle-ci, ils ont fourni aux archéologues, anthropologues et géographes les termes d'hypothèses de travail sur les relations entre le milieu naturel et la situation de certains habitats, sur le rôle des formations sableuses juxtaposées aux aires marécageuses, sur les gisements métallifères, sur la spécificité régionale du bassin ; surtout, les résultats ont permis de préciser des méthodes de travail associant les disciplines concernées et d'en préparer l'extension ailleurs.

L'attention a été portée sur la *localisation* et *l'identification* des unités d'image en termes de *formations de surface, de végétation* et de ce qu'on peut en conclure sur les milieux naturels « anciens » davantage que sur la précision des contours de ces unités ; précision d'ailleurs difficile à atteindre car de nombreuses unités identifiées présentent sur les compositions colorées à 1/500 000 des limites floues, des contours indistincts et des unités de transition de petites dimensions qui n'ont pas toujours été prises en compte dans la cartographie.

Le tracé cartographique représente donc une généralisation par rapport aux informations originales mais cette généralisation n'a pas paru gênante à l'échelle de 1/500 000 car elle est du même ordre que celle des cartes archéologiques qui localisent les sites avec une précision de l'ordre de 2 à 5 kilomètres sur le terrain, soit 0,4 à 1 centimètre sur la carte (1).

Sur le plan thématique, l'identification des unités et leur classement ne paraissent pas entièrement satisfaisants au géographe : ce n'est pas l'insuffisance des données de télédétection qui est ici à invoquer mais celle des travaux de terrain. Partout où elles ont été pratiquées, les observations sont restées superficielles et l'identification des unités géographiques est restée plus descriptive qu'analytique : l'énoncé des formations de surface remplace une géomorphologie vraie ; si quelques termes précis apparaissent *(terrasses, glacis)* ils représentent plus des commodités de nomenclature et des hypothèses vraisemblables que le résultat d'analyses véritables.

Il faut savoir que, avec les mêmes sources et une opération plus lourde, on aurait pu obtenir des résultats plus précis ; mais la question reste posée du rapport entre le poids, en temps et en moyens matériels, des opérations supplémentaires et la masse des résultats qu'elles auraient permis d'acquérir. Dans le bassin de l'Eghazer wan Agadez, il nous semble que des résultats plus détaillés n'auraient pu être obtenus que grâce à un effort considérable porté sur l'étude du terrain, non seulement par des observations, mais par des sondages, l'analyse physico-chimique de matériaux, des mesures, etc...

Dans les limites de l'imprécision à laquelle il est fait allusion plus haut et compte-tenu des confusions entre thèmes qui ont pu se produire lors du classement des unités d'image, on peut considérer que les cartes du bassin de l'Eghazer wan Agadez sont des documents exacts. Les confusions entre unités différentes ont été, autant que possible, éclaircies par l'examen de plusieurs images de la même scène et par le document de l'IGN, *photographie améliorée d'après les données numériques,* à 1/250 000.

Une source d'inexactitude subsiste dans le mode de transfert de la projection Landsat à la projection du fond de carte IGN à 1/500 000. La différence géométrique entre les deux projections est de 0,5 millimètres pour 45 centimètres soit un peu plus de 1 %, proportion inférieure à l'*erreur graphique* généralement admise (2 %). Ce transfert a été fait manuellement, par quart de degré carré, à partir d'amers repérés à la fois sur les images Landsat et la carte topographique.

En ce qui concerne la carte de reconnaissance physiographique de l'Azawagh (2), le problème est autre : il s'agit d'un document préparatoire aux travaux archéologiques ultérieurs.

(1) Cette imprécision du document archéologique publié est en partie volontaire : elle contribue à dissimuler l'emplacement exact des sites aux pillards et aux « archéologues » amateurs.

(2) Carte de reconnaissance physiographique de l'Azawagh, reproduite à 1/1 000 000 ci-joint, hors-texte.

Il n'existe pas, sur les parties septentrionales des pays de l'Azawagh, de cartes topographiques à 1/500 000 sur lesquelles caler la projection Landsat. Nous nous sommes donc contentés, pour ce document provisoire, de nous caler sur les coordonnées des cartes topographiques à 1/500 000 de la zone méridionale (feuilles *Niamey, Dosso, Tahoua*) pour l'ensemble des cartes de l'Azawagh. L'erreur est alors de 3 centimètres au moins pour 80 centimètres, soit plus de 3 %, ce qui paraît excessif. Si on considère en outre l'incertitude relative à la définition, au classement et à la délimitation des unités qui est liée à l'absence de *terrain,* il est nécessaire de prendre la carte de reconnaissance physiographique de l'Azawagh pour ce qu'elle est : un document de travail provisoire.

L'investissement en temps et en moyens, même s'il n'a pas été considérable eu égard à la superficie traitée, justifie que les documents produits et les connaissances acquises soient disponibles pour d'autres usages, d'autres objectifs... Les unités d'images correspondent à des unités géographiques réellement identifiables sur le terrain et dont les qualifications peuvent être énoncées dans le vocabulaire de n'importe quelle discipline. Pour cela, il est nécessaire que l'interprète fournisse les limites de fiabilité de son travail et que celles-ci soient réduites le plus possible.

Il paraît difficile d'atteindre un haut niveau de fiabilité lorsqu'il s'agit d'effectuer l'étude préalable de territoires de vaste extension, mal connus et peu décrits : il n'est guère possible, par définition, de s'appuyer sur les documents existants; il n'est pas praticable de multiplier les échantillons de photographies aériennes ce qui reviendrait à faire une étude par photographies aériennes, simplement complétée et mise à jour par télédétection spatiale... Excellente procédure au demeurant quand elle est possible.

Il est cependant nécessaire de chercher à augmenter la fiabilité en réduisant les risques de confusion et en multipliant la recherche de facteurs discriminants entre les unités qui présentent des caractères radiométriques voisins. Il devient alors indispensable de travailler sur les données numériques et de rechercher, sur l'aire discutée, tous les éléments qui permettront de la classer : une valeur radiométrique plus précise, des contours détaillés mieux identifiables, une texture reconnaissable... En territoire mal connu, cette procédure devra s'appuyer sur un « catalogue » préparé à l'avance de points d'appui thématiquement connus.

Il est également nécessaire de dresser l'inventaire préalable de tous les facteurs susceptibles d'affecter la réflectance des unités (nuances climatiques, interventions humaines, influences saisonnières, etc...) ce qui revient à acquérir une bonne connaissance générale du milieu et de ses dynamiques. Cette connaissance est de toute façon indispensable à toute interprétation, non seulement des données spatiales mais de toutes les données de télédétection.

L'intérêt de l'opération de télédétection spatiale d'intérêt archéologique dans les pays de l'Azawagh ne réside pas seulement dans ses résultats : il réside aussi dans son *caractère renouvelable*.

Nous avons mené l'opération de la façon la plus légère possible, de sorte que le chercheur ou l'équipe de recherche désireux d'effectuer le même genre de travail préliminaire puisse le pratiquer sans obstacles majeurs dans l'enchaînement et la maîtrise des mises en œuvre. Cette simplicité délibérée est matérialisée par :

— le recours aux données photographiques plutôt qu'aux données numériques ;

— un échantillonnage raisonné pour l'étude plus précise de certains secteurs au moyen des photographies aériennes pour définir la qualité des unités et la nature de leurs limites ; des exploitations numériques pour préciser les rapports radiométriques et lever des confusions ;

— des parcours de terrain destinés à préciser *la dynamique* des unités et de leurs limites.

En milieu mal connu, par définition, tout détail perçu est important ; il convient donc de ne restreindre l'information au moyen de sélections et de regroupements que le plus tard possible, d'être aussi peu dirigiste que possible dans l'application des modes de traitement des données spatiales, de *superviser* le moins possible puisqu'on n'a aucun moyen de valider les résultats de ces choix.

Des traitements *automatiques* (non supervisés, par conséquent) seraient-ils exploitables dans ce cas ? et quels traitements automatiques ? à partir de quels points d'appui thématiques « homologués » ? à quel *moment* de l'enchaînement des opérations ?

L'apparition des premières données des satellites d'observation de la Terre a suscité l'intérêt des chercheurs, des aménageurs et planificateurs, des preneurs de décision, notamment dans les pays en voie de développement : c'était là un moyen présumé « simple et facile » d'acquérir l'indispensable *information d'inventaire* dont l'absence était quelquefois invoquée comme responsable des erreurs de planification et des difficultés d'aménagement...

Depuis quelques années, des moyens souvent perfectionnés dans leur simplicité ont été utilisés pour travailler sur les données spatiales et obtenir des résultats à la fois fiables, précis et opérationnels... Les pages qui précèdent ont tenté, à propos d'un territoire particulièrement sensible, concerné par la menace de surpopulation et de désertification, d'apporter une contribution à ces recherches, de formuler quelques orientations méthodologiques et thématiques, de montrer la richesse de l'outil et les précautions qu'il convient d'appliquer à son usage.

Les territoires de vaste extension encore peu connus et insuffisamment décrits sont nombreux à la surface de la Terre. La télédétection spatiale est un outil irremplaçable pour réduire à la fois les hétérogénéités cartographiques et le champ des incertitudes thématiques.

Mais c'est un outil *partiel* dont l'usage judicieux doit être complété par l'investigation *sur place*, non moins essentielle.

La fantastique progression des capacités de traitement et de restitution graphique permet d'envisager avec prudence mais avec espoir d'autres raisonnements géographiques donnant naissance à d'autres cartographies... Mais ceci pose, entre autres problèmes, celui de l'accès des utilisateurs directs — les nationaux des Etats concernés — à ces perspectives.

Il est désormais envisageable que grâce à une exploitation attentive des données spatiales, les territoires mal connus et peu décrits trouvent enfin les cartographies qui leur sont nécessaires et que dans un avenir prévisible, ils n'appartiennent plus qu'au passé de la Géographie.

ANNEXES

1. Vocabulaire

On trouvera ci-dessous la définition des termes spécialisés que nous avons couramment employés. Nous empruntons ces définitions à *Cartographie et Développement,* ouvrage rédigé par le groupe de travail DECADE (1984), et au *Dictionnaire de Télédétection Aérospatiale* par S. Paul et al. (1982).

Absorption

Inverse de *brillance* et de *réflectance.*

Albédo

Fraction exprimée en pourcentage du flux du rayonnement incident, diffusée ou réfléchie par une surface, dans le visible. Un albédo élevé correspond à une surface « claire », un albédo réduit correspond à une surface « sombre ».

Brillance

Pouvoir réfléchissant d'une surface, sur le terrain.

Canal

Gamme de longueurs d'ondes du spectre électromagnétique enregistrée par un capteur.

Composition colorée

Représentation obtenue par une combinaison de couleurs.

Définition

Nombre d'éléments (lignes ou points) composant une image ; il est mesuré au centimètre carré d'image dans les systèmes photo-chimiques. La définition est dite bonne quand ce nombre est élevé.

Fausse couleur

1. Couleur modifiée donnant à l'observateur humain d'une scène de télédétection une perception différente de celle qu'il a naturellement (la *fausse couleur* introduit souvent l'infrarouge proche).

2. Par extension, toute association de bandes spectrales colorées *(composition colorée).*

Image

1. Représentation plane obtenue à partir d'un enregistrement structuré de données saisi par télédétection spatiale.

2. Par extension, l'enregistrement qui permet d'obtenir cette représentation.

Infrarouge proche

Longueur d'onde de la lumière non perceptible à l'œil humain, entre 0,7 et 1,2 micromètres environ.

Infrarouge thermique

Longueurs d'onde du spectre électro-magnétique comprises entre 3 000 et 10 000 micromètres et dont l'enregistrement donne des indications sur les températures des objets.

Lissage

Modification de valeurs radiométriques, conformément à une règle déterminée, pour éliminer les écarts à des valeurs données.

Multidate ou multitemporelle (analyse)

Comparaison de données recueillies sur le même territoire et/ou le même sujet à des dates différentes.

Pixel (abréviation de *picture element*, élément d'image)

Plus petite surface homogène constitutive d'une image enregistrée, définie par les dimensions de la maille d'échantillonnage. Le terme est utilisé en télédétection spatiale et en cartographie informatisée.

Réflectance

Pouvoir réfléchissant d'une surface, exprimé en valeurs radiométriques des pixels correspondants sur l'image spatiale.

Résolution au sol

1. Plus petite distance sur le terrain entre deux points-objets apparaissant distincts sur l'image.
2. Périmètre correspondant, sur le terrain, à la taille de la tache élémentaire enregistrée par le capteur.

Restauration

Ensemble de traitements géométriques et radiométriques destinés à rétablir les caractères fondamentaux d'une image tels que la fournirait un système d'acquisition sans défauts.

Scène

1. Image graphique d'un élément de la surface terrestre élaborée à partir d'appareils divers ou des données d'un ou plusieurs capteurs généralement aéro-spatiaux (satellites).
2. Unité de territoire standard du système.

Signature spectrale

Ensemble des caractéristiques conditionnant l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la matière, qui soient nécessaires et suffisantes pour identifier une surface déterminée.

Télédétection

Ensemble des moyens, des techniques et des résultats de l'observation de la surface terrestre à distance. On distingue télédétection aérienne et télédétection spatiale selon le porteur des capteurs : aéronef (avion et ballon) et satellite en orbite.

Vue

Enregistrement aéro-spatial caractérisé par les coordonnées de la *scène* (trace et rang sur les données Landsat) et par la *date* d'enregistrement.

Zonage

1. Définition en termes radiométriques et délimitation d'unités sur images de télédétection, complétées par une interprétation plus ou moins poussée.

2. En géographie du Développement, détermination d'aires d'égales potentialités naturelles et socio-économiques d'un territoire ; ce *zonage* est souvent préparé par une exploitation de données de télédétection.

2. Caractéristiques des satellites cités et de leurs capteurs

	METEOSAT	LANDSAT 1 et 2	SPOT
Altitude	36 000 km	920 km	822 km
Fréquence de passage ou d'enregistrement	héliosynchrone (stable au dessus d'un point de la Terre)	18 jours et 18 jours, soit 9 jours	5 jours
Bandes spectrales	trois : visible, infrarouge thermique, « vapeur d'eau »	quatre : trois dans le visible, un dans l'infrarouge proche	quatre : deux dans le visible, un dans l'infrarouge proche, un panchromatique
Résolution au sol théorique	2 500 mètres et 5 000 mètres	56 mètres sur 79 mètres	20 mètres et 10 mètres
Périmètre de la scène	hémisphère entier (20 000 km x 20 000)	185 km x 185	60 kilomètres x 60
Heure d'enregistrement approximative sur l'Azawagh	toutes les demi-heures	environ 9 h 30 GMT	

3. Ouvrages cités

AMADOU A. 1979 : *Agadez et sa région,* Etudes Nigériennes n° 44, IRSH, Niamey.

ALATNINE AG ARIAS et BERNUS E. 1977 : Le jardin de la sécheresse, l'histoire d'Amumen ag Amastan, *Journal des Africanistes,* t. 47 n° 1, pp. 83-94.

ALBUISSON M. BARDINET C. MONGET J.M. 1982 : Perception des paysages africains par Landsat et Météosat aux échelles zonales et régionales, *La cartographie thématique des résultats de la télédétection,* GDTA, Toulouse, pp. 199-221.

BARDINET C. 1981 : Télédétection des paysages africains par Landsat et Météosat, *Annales de Géographie* n° 499, Mai-Juin 1981, pp. 354-380.

BARDINET C. et Al. 1982 : a) *Télédétection et Géographie appliquée en zone aride et sud-méditerranéenne,* Collection de l'Ecole Normale Supérieure de Jeunes filles, n° 19, Paris. 407 p. Cartes, photos. b) *Comparaison des signatures spectrales de Landsat et Spot dans le cas des ensembles de grès affleurant du Plateau de Bandiagara au Mali,* Symposium International GDTA, Toulouse.

BARDINET C. et MONGET J.M. 1980 : *Lanchad Télédétection et Géographie appliquée en zone sahélienne du Tchad,* Collection de l'Ecole Normale Supérieure de Jeunes filles, n° 12, Paris, 544 p. Cartes, photos.

BARDINET C. MONGET J.M. PATOUREAUX Y. 1982 : *Télédétection multitemporelle de l'occupation du sol en Afrique Sahélienne par Météosat 1,* Symposium International, GDTA, Toulouse.

BARGERY R.G.P. 1934 : *Hausa-English Dictionnary,* Oxford University Press, Londres.

BEAUDET M. et Al. 1976 : Formes, formations superficielles et variations climatiques récentes du Sahara Occidental, *Revue de géographie physique et de géologie dynamique,* 18 n° 1-2, pp. 157-174.

BEAUVILAIN A. 1977: *Les Peuls du Dallol Boso,* Etudes Nigériennes n° 42, IRSH Niamey. 1977, 274 p. Cartes.

BERNUS E. 1970: Espace géographique et champs sociaux chez les Touaregs Illabakan, *Etudes Rurales* n° 37 - 38 - 39, Juillet - Septembre 46-64.

BERNUS E. 1974 : *Les Illabakan (Niger), une tribu Touarègue sahélienne et son aire de nomadisation,* Atlas de Structures agraires au sud du Sahara n° 10, Paris, ORSTOM-Mouton.

BERNUS E. 1977 : Etude de cas sur la désertification, région d'Eghazer et Azaouack, Niger, *Conférence des Nations Unies sur la désertification,* Nairobi 1977.

BERNUS E. 1978 : AZAWAGH (Azawaq, Asawak) *Encyclopédie Berbère* édition provisoire Cahier n° 21, Aix-en-Provence, Lapemo-Université de Provence.

BERNUS E. 1981 : *Touaregs nigériens : unité culturelle et diversité régionale d'un peuple pasteur,* Mémoire ORSTOM n° 94, Paris, 1981.

BERNUS E. et BERNUS S. 1972 : *Du Sel et des Dattes, introduction à l'étude de la Communauté d'In Gall et de Tegidda n'Tesemt,* Etudes Nigériennes n° 31, Niamey CNRSH.

BERNUS E., FAUCK R., PEYRE de FABREGUES B. 1983 : *Lutte contre la désertification au Niger,* mise à jour de l'étude de cas, rapport de mission sous forme provisoire, ORSTOM, Paris.

BERNUS E. et PONCET Y. 1981 : *Etudes exploratoire du milieu naturel en zone semi-aride par télédétection (région de l'Azawagh),* Initiations et Documents techniques, Télédétection n° 5, ORSTOM, Paris, 40 p.

BERNUS E., BERNUS S. et PONCET Y. 1984 : *Méthodologie et Les Environnements, Rapport Final du Programme Archéologique d'Urgence, Région d'In Gall et Tegiddan Tesemt,* Etudes Nigériennes n° 48, IRSH, Niamey, 196 p. Cartes.

BERNUS S. et GOULETQUER P.L. 1976 : Du cuivre au sel recherches ethno-archéologiques sur la région d'Azelik, *Journal des Africanistes* t. 46 n° 1-2, 1976, pp. 7-68.

BIRD-IBRD, 1976 : *Index of Landsat Imagery, 1972-1975,* International Bank for Research and Development, Washington D.C.

BOUDET G. et de WISPELAERE G. 1977 : *Classification des pâturages tropicaux et niveaux de télédétection.* IEMVT/FAO. Ronéo. 80 p. Bibliographie.

BOULET R. 1966 : *Observations pédologiques dans le Tamesna Oriental (Rép. du Niger) : Relations sol-végétation.* ORSTOM-OCLALAV, Dakar.

CEGET 1976 : *Télédétection et Environnement Tropical,* Travaux et Documents de Géographie Tropicale n° 25 CEGET-CNRS, Paris Bordeaux, 171 p. Cartes, photos.

CHAMARD P. 1976 : Essai sur les paléoclimats du Sud-Ouest Saharien au Quaternaire récent, *La désertification en Afrique au Sud du Sahara,* Colloque de Nouakchott déc. 1973, Dakar, Nouvelles Editions Africaines, pp. 21-25.

CHARNEY J.G. 1975 : Dynamics of deserts and drought in the Sahel, *Quaterly Journal of the Royal Meteorological Society,* v. 101, pp. 193-202.

CHESNAIS M. 1979 : Télédétection : de la recherche fondamentale à l'aménagement, *L'Espace Géographique,* 1, p. 24.

CIEH 1965 : *Bibliographie hydrologique concernant la République du Niger,* CIEH, Ouagadougou.

CIEH-ORSTOM 1976 : *République du Niger, précipitations journalières de l'origine des stations à 1965.* 505 p.

CLOS-ARCEDUC M. 1956 : Etude sur photographies aériennes d'une formation végétale sahélienne, la brousse tigrée, *Bulletin de l'IFAN,* série A, t. XVII, 677-684.

COCHEME J. et FRANQUIN P. 1967 : *Rapport technique sur une étude d'agroclimatologie de l'Afrique sèche au sud du Sahara en Afrique Occidentale,* Rome, FAO-UNESCO-OMM, 325 p.

Collectif 1984, 1985 et à paraître : *Rapport final du Programme Archéologique d'Urgence, Région d'In Gall et Tegidda n Tesemt,* 6 vol. Etudes Nigériennes n° 47 à 52, IRSH, Niamey (cf. Bernus, Poncet, Paris).

COLLET C. 1981 : Comparaison de méthodes de classification appliquées à des données de télédétection, *L'Espace Géographique,* 1, pp. 25-32.

COMMISSARIAT à l'Energie Atomique, *Cartes Géologiques,* Afasto, 1/200 000, 1977, Teguida n'Tessoum, 1/200 000, 1978, Tegama, 1/500 000, 1981 et notices, Ministères des Mines, Niamey.

COOLEY M.E. et TURNER R.M., 1982 : *Application of Landsat Products in Range and water Management Problems in the Sahelian Zone of Mali, Upper Volta and Niger,* Geological survey professional paper 1058, U.S. Government printing office, Washington, 27 p.

COUREL M.F. 1983 : *Analyse des changements biogéophysiques dans le Sahel à partir des mesures des satellites,* IBM France, Paris, 41 p., photos.

COUREL M.F. 1985 : *Etude de l'évolution récente des milieux Sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites,* IBM, Paris, 407 p. + annexes.

COUREL M.F. et HABIF M. 1983 : *Measurement of changes in Sahelian Surface Cover using Landsat albedo images.* IBM France, Paris, 16 p., photos.

COUREL M.F., KANDEL R.S., RASOOL S.I., 1984 : Surface albedo and the Sahel drought, *Nature,* vol. 307 n° 3951, 9-15 feb., 528-531.

DALSTED K.J. et WORCESTER B.K. 1979 : Remote Sensing for interpretations of soil-plant interactions as indicators of desertification in western Africa, in *Arid land plant resources : procedings of the International Arid Lands* Conference on Plan Resources, International Center of Arid and Semi-Arid Land Studies, Texas Techn. University, pp. 629-649.

DORIZE L. 1976 : L'oscillation climatique actuelle au Sahara, *Revue de géographie physique et de géologie dynamique,* v. 18, pp. 217-228.

DURAND A. 1983 : Evolution géomorphologique, stratigraphique et paléoclimatique au Pléistocène supérieur et à l'Holocène de l'Aïr oriental (Sahara méridional, Niger), *Revue de Géologie dynamique et de Géographie physique,* vol. 24. fasc. 1, pp. 47-59.

ESCADAFAL R. et MTIMET A. 1971 : *Apport de la Télédétection spatiale à la Cartographie des ressources en sols de la région de Medenine,* Rép. Tunisienne, CNRS-CEPE-CNES, Montpellier.

FAURE H. 1963 : *Inventaire des évaporites du Niger, mission 1963,* Ministère des Travaux Publics, des Mines et de l'Hydraulique, Niamey, BRGM Dakar, 158 p. + annexes.

FAURE H. et WILLIAMS M.A.J. 1980 : *The Sahara and the Nile, quaternary environments and prehistoric occupation in northern Africa,* Balkama - Rotterdam et Maisonneuve et Larose - Paris.

FOIN F. 1981 : Textures et signatures spectrales, 2 aspects complémentaires et indissociables pour l'interprétation des images satellite, *Signatures spectrales d'objets en télédétection,* Colloque International, Avignon, 8-11 Septembre 81, INRA, CNES, Paris, pp. 372-377.

FOUCAULT A. et RAOULT J.F. 1980 : *Dictionnaire de géologie,* Masson Paris.

GADO B. 1980 : *Le Zarmatarey, Contribution à l'histoire des populations d'entre Niger et Dallol Mawri,* Etudes Nigériennes n° 45, IRSH, Niamey.

GALLAIS J. 1975 : *Pasteurs et paysans du Gourma, la condition sahélienne,* mémoire CEGET, Bordeaux, CNRS, Paris, 239 p. carte hors-texte.

GAVAUD M. 1965 : *Etude pédologique du Niger Ouest,* 2 vol., ORSTOM, Paris.

GAVAUD M. 1975 : *Sols et pédogénèse au Niger méridional,* 4 vol., ORSTOM, Paris.

GAVAUD M. 1977 : *Interprétation chronologique des systèmes de dunes fixées du Niger méridional,* ORSTOM, Paris.

GAVAUD M. 1977 : *Les grands traits de la pédogénèse au Niger méridional,* Travaux et Doc. ORSTOM n° 76, 97 p., Paris.

GAVAUD M. et BOULET R. 1967 : *Carte pédologique de Reconnaissance du Niger, 1/500 000* en 3 planches couleurs, ORSTOM, Paris.

GREIGERT J. 1965 : *Essai de carte hydrogéologique du Niger,* 1/1 000 000, tirage ozalid, non datée probablement 1965.

GREIGERT J. 1966 : *Description des formations crétacées et tertiaires du bassin de lullemmeden (Afrique Occidentale).* Paris, BRGM, 234 p., Niamey direction des mines et de la géologie, publication n° 2.

GREIGERT J. 1968 : *Les Eaux Souterraines de la République du Niger,* BRGM, 2 volumes.

GREIGERT J. et POUGNET R. 1965 : *Carte géologique, République du Niger,* 1/2 000 000. BRGM, Orléans.

GREIGERT J. et POUGNET R. 1967 : *Essai de description des formations géologiques de la République du Niger,* Paris BRGM Niamey Direction des mines et de la géologie, publication n° 3, 271 p.

GREIGERT J. et SAUVEL C. 1970 : *Modernisation de la zone pastorale nigérienne, étude hydrogéologique, Atlas,* Paris BRGM, Niamey, Direction de l'Elevage.

HAMANI D. 1975 : *Contribution à l'étude de l'histoire des Etats Hausa, l'Adar précolonial,* Etudes Nigériennes n° 38, IRSH, Niamey.

HOEPFNER M. 1977 : *Etude hydrologique des bassins de Tabelot* (campagne 77), ORSTOM, Génie Rural, Niamey.

IBN BATTUTA 1982 : *Voyages,* vol. III : Inde, Extrême-Orient, Espagne et Soudan, Maspero, Paris.

IEMVT-LNERV (Niamey) 1971 : *Evolution des pâturages naturels sahéliens du Sud Tamesna (Rép. du Niger),* IEMVT, Maisons-Alfort, Laboratoire de l'Elevage, Niamey.

IGN-SETRA 1980 : *Agadez, esquisse topographique sur composition colorée Landsat,* 1/250 000 environ, IGN, Paris.

JOULIA F. 1937 : Sur l'existence d'un important système de fractures intéressant le Continental Intercalaire de l'Ouest de l'Aïr (Niger AOF). *Bulletin Société Géologique de France,* 6e série, t. VII, fasc. 1-3, Paris, pp. 137-143.

JOULIA F. 1963 : *Carte géologique de reconnaissance de la bordure sédimentaire de l'Aïr,* 2 planches couleurs, BRGM Orléans.

KARIMOU M. 1977 : *Tradition orale et Histoire, les Mawri Zarmaphones des origines à 1898,* Etudes Nigériennes n° 39, IRSH, Niamey.

KIMBA I. 1981 : *Guerres et sociétés, les populations du « Niger » Occidental au XIXe s. et leurs réactions face à la colonisation,* Etudes Nigériennes n° 46, IRSH, Niamey.

KNOLL-GANTNER P.M. 1983 : *Applications de la Télédétection spatiale en archéologie,* Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, thèse de 3e Cycle.

LONG G. et LACAZE B. 1978 : *Contribution à l'analyse écologique des zones arides en Tunisie avec l'aide de la Télédétection spatiale,* expérience ARZOTU, rapport final 75-78, CNRS-CEPE-CNES, Montpellier

LORTIC B. 1984 : *Une méthode d'analyse visuelle d'une image spatiale ; objectivation du zonage manuel,* Mémoire EHESS, 70 p. illustrations.

LORTIC M.C. 1980 : *Techniques photo-chimiques appliquées à la Télédétection,* EHESS, Laboratoire de graphique, Paris, 31 pages.

MAINGUET M. 1976 : *Images satellites et morphologie des zones arides et sahéliennes, Apports de la télédétection à l'étude des régions arides et subarides,* CNEAT, Strasbourg.

MAINGUET M. 1976 : Propositions pour une nouvelle classification des édifices sableux éoliens d'après les images des satellites Landsat I, Gemini, Noaa 3, *Zeitschrift für Geomorphologie* Berlin, pp. 275-296.

MAINGUET M. et CANON L. 1976 : vents et paléovents du Sahara, tentative d'approche paléoclimatique, *Revue de géographie physique et de géologie dynamique* (2) vol. XVIII, fasc. 2-3, pp. 241-250.

MAINGUET M. et CANON L. 1977 : Carte des degrés de réactivation des manteaux sableux, *Conférence des Nations Unies sur la désertification, étude de cas sur la désertification, région d'Eghazer et Azaouak, Niger,* Annexe 1, fig. 6, Nairobi, Août-Septembre 1977.

MAINGUET M. CANON-COSSUS L. CHEMIN M.C. 1979 : Dégradation dans les régions centrales de la République du Niger : degré de responsabilité de la nature du milieu, de la dynamique externe et de la mise en valeur par l'homme, *Travaux de l'Institut géographique de Reims,* n° 39-40, pp. 61-73.

MALEY J. 1981 : *Etudes palynologiques dans le bassin du Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique Nord Tropicale de 30 000 ans à l'époque actuelle.* Trav. et Doc. n° 129, ORSTOM, Paris.

MARLIAC A. et PONCET Y. à paraître, 1985 : Réflexions sur une expérience d'application de la télédétection spatiale à l'étude des peuplements anciens du Diamaré (Cameroun septentrional) *Cahiers de l'ORSTOM* série Sciences Humaines, numéro spécial.

MERING C., PONCET Y., RAKOTO-RAVALONTSALAMA M. 1985 : Pour une nouvelle description de la terre, traitements numériques d'image spatiale appliqués aux dunes du Sahel, *Programmation et Sciences de l'Homme* n° 4, Laboratoire Informatique des Sciences de l'Homme, Paris, 27 p.

MICHEL P. 1977 : Les modelés et les dépôts du Sahara méridional, du Sahel et du Sud-Ouest Africain. Essai de comparaison, *Recherches géographiques à Strasbourg,* Strasbourg, n° 5, pp. 5-36.

PARIS F. 1984 : *Les sépultures du Néolithique final à l'Islam, Rapport final du Programme Archéologique d'Urgence, région d'In Gall - Tegidda-n-Tesemt,* Etudes Nigériennes n° 50, IRSH, Niamey, 233 p.

PAUL S. et Al. 1982 : *Dictionnaire de Télédétection aérospatiale,* Masson, Paris.

PEYRE de FABREGUES B. 1977 : *Lexique des noms vernaculaires des plantes du Niger,* 2e édition provisoire, étude botanique n° 3bis, Maisons-Alfort, IEMVT, Niamey, Laboratoire d'Elevage, 79 p. 2 vol.

PEYRE de FABREGUES B. et LEBRUN J.P. 1976 : *Catalogue des plantes vasculaires du Niger,* étude botanique n° 3, Maisons-Alfort, IEMVT, Niamey, Laboratoire d'Elevage, 433 p.

PONCET Y. 1973 : *Cartes ethno-démographiques du Niger,* Etudes Nigériennes n° 32, CNRSH, Niamey.

PONCET Y. 1974 : *La sécheresse en Afrique Sahélienne ; une étude régionale en République du Niger, la Région des Dallols,* OCDE - Centre de Développement, Paris.

PONCET Y. (sous la direction de) 1983 : a) *Atlas, Rapport Final du Programme Archéologique d'urgence, région d'In Gall - Tegiddan Tesemt,* Etudes Nigériennes n° 47, IRSH, Niamey, 12 cartes, notice 90 p. photos.

b) Minerais et exploitations métallurgiques : une réflexion géographique, *Métallurgies Africaines,* édité par N. Echard, Mémoires de la Société des Africanistes, Paris, 199-208.

c) Télédétection et Archéologie à l'échelle régionale : une opération sur les données Landsat, 1er Symposium International CRIAA, Université de Bordeaux III, Bordeaux.

PONCET Y. (sous la direction de) et groupe DECADE 1984 : a) *Cartographie et Développement,* Ministère des Relations extérieures, Coopération et Développement, Paris, 181 p. illustr.

PONCET Y. 1984 : La Télédétection spatiale dans un inventaire géographique à petite échelle, *L'Espace Géographique,* n° 3, 173-184.

PONCET Y., BERNUS E. et BERNUS S., 1984 : *Méthodologie et les Environnements, Rapport final du Programme Archéologique d'Urgence, Région d'In Gall et de Tegiddan Tesemt,* Etudes Nigériennes n° 48, IRSH, Niamey, 196 p. Cartes.

RCP 322 (collectif) 1979 et suivantes : Programme Archéologique d'Urgence In Gall - Tegiddan Tesemt (département d'Agadez), *Documents,* présentation provisoire, RCP 322, du CNRS, Paris.

RECLUS E. 1906 (réédité) 1982 : *L'Homme et la Terre,* morceaux choisis, coll. la Découverte, Maspero, Paris, 2 volumes.

REINING P. : Utilisation of ERTS 1 imagery in cultivation and settlement sites : identification and carrying capacity estimates in Upper Volta and Niger. *Final report to aid office in accordance with the terms of AID/W Contract n° AID/CM. afr. - C-73-21. 1973. 155 p. 46 tableaux, 32 photos.*

ROGNON P. 1976 a) Les oscillations du climat saharien depuis 40 millénaires, Introduction à un vieux débat, *Revue de Géographie physique et de géologie dynamique,* 18 n° 2-3, pp. 147-156.

b) Constructions alluviales holocènes et oscillations climatiques du Sahara méridional, *Bulletin de l'Association des Géographes Français,* Paris, 53 n° 433-434, pp. 77-84. Bibliographie.

c) Essai d'interprétation des variations climatiques au Sahara depuis 40 000 ans, *Revue de géogr. phys. et de géol. dyn.* 18 n° 2-3, p. 251-282.

ROGNON et Al. 1983 : Anomalies et crises climatiques, séance de l'Association de géographes français, *Bulletin de l'Ass. de Géographes français,* n° 494-495, avril-mai 1983.

SERVANT M. 1983 : Séquences continentales et variations climatiques : évolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur. Travaux et Documents de l'ORSTOM, n° 159.

TALBOT M. R. et WILLIAMS M.A.J. 1978 : Erosion of fixed dunes in the Sahel Central Niger. *Earth Surfaces Processes, vol. 3.* 107.113. John Wiley and Son Limited. New-York.

THIELLEMENT A. 1949 : *Azawar,* Saint-Vaast la Houge, l'amitié par le livre - Camille Belliard, 226 p.

TRICARD J. 1977 : *Apports de la Télédétection à l'étude des régions arides et subarides,* Centre d'Aménagement du milieu naturel, Université de Strasbourg.

VALENTIN C. 1981 : *Organisation pelliculaire superficielle des sols dans la cuvette d'Agadez (Rép. du Niger).* Thèse de 3e cycle, Paris VI, ORSTOM. Etudes et Thèses, Paris 1985.

WHITE L.P. : Brousse tigrée patterns in Southern Niger, *Journal of Ecology,* n° 58, pp. 549-553.

WILHET J. 1981 : Télédétection par satellite et espaces régionaux, *L'espace géographique,* 2, pp. 89-98.

WISPELAERE G. et WAKSMAN G. 1977 : Contribution du traitement des images-satellite à la cartographie des pâturages sahéliens. *Revue d'Elevage et de Médecine vétérinaire des pays tropicaux,* tome XX n° 4, 407-423.

En complément :

AMBOUTA K. 1984 : *Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'ouest nigérien,* thèse, Université de Nancy I, 120 p.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS 15

INTRODUCTION 21

PREMIERE PARTIE : PRESENTATION GEOGRAPHIQUE 35

1. Le climat 35
2. Hydrographie 41
3. Géologie et structure 42
4. Sols et couvert végétal 53
5. Les ressources en eau 55
6. Peuplement et activités 56

DEUXIEME PARTIE : LES OUTILS DE LA SPATIALISATION ET LEUR UTILISATION 65

1. Les sources d'information 65
   1.1. Les cartes thématiques 65
   1.2. Les cartes topographiques 68
   1.3. Les photographies aériennes 70
   1.4. Les données de télédétection spatiale 73
      1.4.1. Landsat 73
      1.4.2. Météosat et Spot 73

2. L'étude du bassin de l'Eghazer wan Agadez 75
   2.1. Les vues Landsat utilisées 76
      2.1.1. La sélection des vues exploitables 76
      2.1.2. Le milieu naturel correspondant à ces vues 78
      2.1.3. Les traitements photographiques 79
      2.1.4. Les exploitations numériques 80
      2.1.5. La composition colorée améliorée 80
   2.2. L'acquisition de l'information 84
      2.2.1. Les problèmes à résoudre 84
      2.2.2. La préparation aux travaux sur le terrain 84
      2.2.3. Les travaux sur le terrain 86
   2.3. L'intérêt des résultats 89

3. L'Etude de l'Azawagh central et des Dallols 92
   3.1. Les vues Landsat utilisées 93

3.2. L'acquisition de l'information 98
3.2.1. Les unités de teinte-texture 98
3.2.2. L'aide des cartes tophographiques et des photographies aériennes 99
3.2.3. Les images Landsat complémentaires de la « deuxième série » 99
3.3. Les résultats 101
3.3.1. La « carte de reconnaissance physiographique de l'Azawagh » 101
3.3.2. Sur le plan thématique : informations nouvelles et risques de confusions 102

4. Deux études complémentaires : Météosat et Spot 104
4.1. Un survol général par Météosat 104
4.1.1. Les données utilisées 104
4.1.2. Les informations obtenues 105
4.2. Une étude partielle sur simulation Spot 109

TROISIEME PARTIE : LES RAPPORTS ENTRE IMAGE SPATIALE ET PAYSAGE 119

1. Les formations de surface 120
1.1. Les surfaces meubles non cohérentes : les sables 120
1.2. Les surfaces meubles cohérentes : les argiles 123
1.2.1. Les montmorillonites 124
1.2.2. Les kaolinites 124
1.2.3. Les argiles des dépressions fermées au pied des Cuestas 125
1.2.4. Les argiles des dépressions interdunaires 126
1.3. Les formations rugueuses 126
1.3.1. Les regs à blocs vernis et les éboulis dans l'Eghazer wan Agadez 127
1.3.2. Les « terrasses » de l'Eghazer et les argilites 128
1.3.3. Les formations de surface rugueuses dans l'Azawagh et les Dallols 129
1.4. Exemples détaillés 129
1.4.1. La région d'Azelik 131
1.4.2. Les formations rocheuses vernies dans les grès du Tegama 135
1.4.3. Quelques organisations dunaires dans l'Azawagh 141
Le massif de Tin Drarin 141
Agalamlam Est 141
Le revers du plateau de Tajinjer 144
1.5. Les formations de surface sur les données de simulation Spot 147

2. La végétation 149
2.1. Les formations végétales fermées 150
2.1.1. Les formations arborées fermées du type agoras 150
Exemple : la forêt de Kerbubu 152
2.1.2. Les formations fermées, spontanées, étagées du sud et les jachères 156
2.1.3. Les formations hydromorphes 157
2.1.4. Les formations herbacées fermées de l'Eghazer wan Agadez 157
2.2. Les formations ouvertes 159
2.2.1. Les steppes sans arbres discontinues 160
2.2.2. Les steppes arborées discontinues 161
Exemples : la dune d'Azelik 162
l'Azar à In Kutayan 165
2.3. Les formations hétérogènes répétitives 165
2.3.1. Les systèmes réticulés dunes - bas-fonds 166
Exemples : le secteur de Tin Jekoda 166
la zone « T3 » 168

2.3.2. Les systèmes de type « brousse tigrée » 170
Exemples : le plateau de Kiota et le plateau de Matankari 170
les secteurs de Dinkildimi 173
2.4. L'évolution de la végétation 177
2.4.1. Le contraste saisonnier 177
2.4.2. L'évolution inter-annuelle, la désertification 180

3. L'hydrographie 182
3.1. L'hydrographie actuelle 183
3.1.1. Un cas particulier : l'eau libre 183
3.1.2. Les réseaux actuels et leur dynamique 183
3.2. Les indices d'hydrographie ancienne 186
3.2.1. Les indices alluvionnaires 186
3.2.2. Les textures orientées 187
Exemple : Afara-Tuluk 187
3.2.3. Une approche des dynamiques anciennes 189
Exemples : Tegiddan Tesemt - Azelik 189
Indika 190
Tabotakit 190
Fabiji 193

4. La présence humaine 196
4.1. Les terroirs agricoles 196
4.1.1. Les terroirs du sud sahélien 196
4.1.2. La zone agricole marginale 198
4.2. La présence humaine dans la zone nord sahélienne 199

QUATRIEME PARTIE : UNE ETUDE DES PAYS DE L'AZAWAGH PAR TELEDETECTION SPATIALE : BILAN ET CONCLUSIONS 205

1. Les lacunes et les anomalies 205

2. Les rapports des données de télédétection spatiale aux autres représentations du territoire 208
2.1. Le rapport aux cartes existantes 208
2.2. Le rapport aux photographies aériennes 210
2.3. Le rapport au terrain 211
2.4. Le rapport des données spatiales entre elles 212

3. Pour une utilisation ultérieure : fiabilité et renouvellement 213

ANNEXES

1. Vocabulaire 219
2. Caractéristiques des satellites cités et de leurs capteurs 222
3. Ouvrages cités 223
4. Index 230
5. Illustrations couleurs 241
6. Carte de reconnaissance physiographique de l'Azawagh, 1/1 000 000 hors-texte, légende et dépliant

LISTE DES ILLUSTRATIONS

1. Europe-Afrique 22
2. Périmètres étudiés 24
3. Carte des lieux cités 33
4. La pluviométrie dans les pays de l'Azawagh 36
5. Pluies utiles à Filingué 38
6. Evaporation, températures et pluies à Agadez 40
7. Le bassin des Iullemmeden, structure 43
8. Le bassin des Iullemmeden, géologie 47
9. Le bassin des Iullemmeden, le Quaternaire 49
10. Représentation schématique des phases climatiques de la bordure sud du Sahara depuis le 40 e millénaire 52
11. Répartition de la population 57
12. Histoire et préhistoire 59
13. Cartes thématiques générales 67
14. Couverture topographique 69
15. Couvertures aériennes 71
16. Coordonnées du réseau Landsat 72
17. Rapport entre nombre de vues présumées satisfaisantes et exploitables et nombre de vues enregistrées au catalogue USGS 72
18. Disponibilité des vues Landsat 1 et 2 pour les scènes intéressant les régions de l'Azawagh et des Dallols 74
19. Scène 204-048, repères toponymiques 81
20. Scène 204-048, vue du 12 janvier 1976, canal 5 82
21. Les données de la télédétection (bassin de l'Eghazer) 87
22. Vues de première série 97
23. Vues de deuxième série 97
24. Météosat, vue du 12.04.79 106
25. Météosat, croquis de situation d'après la vue du 12.04.79 108
26. Simulation Spot, courbes des valeurs radiométriques 111
27. Vallée de Tyeral, photographie aérienne 113
28. Simulation Spot, traçage 115
29. Kori Tiegubay, photographie au sol 130
30. Vallée de l'Eghazer wan Agadez, photographie au sol 130
31. Le secteur d'Azelik, croquis géographique 131
32. Le secteur d'Azelik, niveaux radiométriques 132
33. Formations de surface près d'Azelik, photographie au sol 133
34. Coupe dans le kori de Tiegubay 134
35. Traçage de polynombre : « grès de Tegama » 136

36. La cuesta à Izadelagan, coupe 136
37. Traçage de polynombre : « bordure des grès de Tegama » 138
38. La cuesta à Izadelagan, photographie 139
39. La butte d'Anyokan : polynombres 140
40. La butte d'Anyokan : courbes radiométriques 140
41. Tin Drarin, croquis d'après photographies aériennes 142
42. Agalamlam Est, croquis d'après photographies aériennes 143
43. Tajinjer, croquis d'après photographies aériennes 144
44. Tajinjer, teintes dunaires 145
45. Tajinjer, coupe de la cuesta 145
46. Simulation Spot, courbes des valeurs radiométriques 148
47. Forêt de Kerbubu, croquis d'après photographies aériennes 151
48. Forêt de Kerbubu, courbes des valeurs radiométriques 153
49. Forêt de Kerbubu, photographies au sol. 155
50. Evolution de l'aire forestière de Kerbubu 156
51. Festons de végétation réflichissante, image Landsat 158
52. Formation « tazmey », photographie 159
53. Formation végétale sur les sables, photographie au sol 162
54. Azelik, croquis de répartition des ligneux 163
55. In Kutayan, croquis d'après photographie aérienne 164
56. Tin Jekoda, croquis d'après photographies aériennes 167
57. Secteur « T3 », croquis d'après photographies aériennes 169
58. Brousse tigrée, photographie aérienne 171
59. Brousse tigrée, photographie au sol 172
60. Matankari, croquis d'après photographie aérienne 172
61. Secteur de Dinkildimi, coupe 173
62. Dinkildimi, croquis d'après photographies aériennes 174
63. Dinkildimi, croquis d'après photographies aériennes 174
64. Lignes de végétation, croquis d'après Météosat 179
65. La région d'Afara-Tuluk, image Landsat 187
66. Indika, croquis d'après photographies aériennes 191
67. Tabotakit, croquis d'après photographies aériennes 194
68. Fabiji, croquis d'après photographies aériennes 194

EN ANNEXE :

69. Azelik, niveaux radiométriques (Landsat)
70. Amumun, niveaux radiométriques (Landsat)
71. Agalamlam Est, composition colorée photographique (Landsat)
72. Tajinjer, composition colorée photographique (Landsat)
73. Tyeral composition colorée numérique (Spot)
74. Kerbubu, niveaux radiométriques (Landsat)
75. Azelik, niveaux radiométriques (Landsat)
76. Scène 205-048, composition colorée photographique (Landsat)
77. In Kutayan-Tin Jekoda, composition colorée photographique (Landsat)
78. Dinkildimi, composition colorée photographique (Landsat)
79. Indika-Tabotakit, composition colorée photographique (Landsat)
80. Kiota-Fabiji, composition colorée photographique (Landsat)
81. Scène 206-049, composition colorée photographique (Landsat)
82. Scène 206-051, composition colorée photographique (Landsat)
Hors-texte : carte physiographique de l'Azawagh

INDEX

Abala 21
Aboy 45
Acacia albida 54, 95, 119, 177, 193, 195, 197
Acacia ehrenbergiana 54, 139, 150, 152, 154, 162, 181
Acacia nilotica 54
Acacia raddiana 54, 150, 152, 154
Adamsonia digitata 54
Adar Aghalen 128
Ader 23, 46, 56, 105, 107, 186, 195, 208
Adrar des Ifoghas 21, 28, 41, 42, 45, 51, 107, 109
Afara 128, 182, 187, 188
Agadez 23, 25, 26, 39, 40, 42, 56, 75, 78, 79, 89, 96, 109, 110, 121, 125, 152, 156, 181, 185, 188, 189, 200
Agadez (grès d') 45, 75, 76, 83, 91, 105, 107, 128, 131, 135, 150, 154, 161, 165, 187
Agalamlam 46, 102, 105, 122, 126, 127, 129, 141, 143, 185, 195, 208
Agasanar 128
Agatara 181
Ahaggar 21, 41, 42, 45, 105, 107, 109, 188
Aïr 21, 23, 26, 41, 42, 45, 65, 66, 70, 73, 75, 76, 83, 85, 91, 105, 107, 109, 119, 121, 149, 150, 180, 181, 184, 188, 189, 195, 208
Akenzigi 128
Amelolud 200
Amumun 134, 135
Anasafar 83
Anderambukan 183
Andropogon gayanus 54, 193
Anogeissus leiocarpus 54, 119
Anu Araren 56
Anu Zeggerin 188
Anyokan 45, 76, 80, 83, 89, 127, 128, 129, 139, 140, 147
Arewa 23
Aristida sspp 54, 89, 90, 128, 154, 157, 159, 161
Arlit 56, 79, 188, 200
Asakaré 183, 186
Asawas 45, 80, 83
Asawas (grès d') 45, 107
Atakora 180
Ayorou 126
Azadirachta indica 196
Azagaret 23, 41, 186
Azar 23, 41, 46, 101, 102, 122, 165, 168, 185, 186, 193
Azar Dararey, voir Dararey
Azelik 26, 45, 70, 75, 80, 83, 85, 86, 91, 121, 129, 131 à 135, 154, 162, 163, 185, 189
Azuza 45, 76, 83, 86, 127

Bagaji 186
Bagzan 41
Balanites aegyptiaca 54, 150, 152
Bamako 99
Bamba 51
Bénin (Etat) 207
Bilma 109, 121, 200
Birni n'Gaouré 55, 197
Birni n'Konni 39
Boboye 23
Bonkoukou 56
Boscia senegalensis 152
Boumba 51

Calotropis procera 55, 200
Cambro-ordovicien 45
Cameroun 207
Cenchrus biflorus 54

Centrafrique (Etat) 207
Chin Salatin 105
Chin Tafidet 75, 188
Chirozerin (série de) 45
Commiphora africana 54, 161, 180
Continental intercalaire 42, 75, 76, 107
Continental terminal 46, 54, 107, 121, 129, 165, 170, 173, 208
Crétacé 45
Cynodon dactylon 55

Dabla 107
Dakoro 200
Dallol Boso 21, 23, 29, 35, 41, 42, 54, 56, 101, 102, 121, 170, 173, 193, 195, 197
Dallol Mawri 21, 23, 29, 35, 41, 54 à 56, 102, 157, 172, 173, 186, 197
Dararey 193
Dinkildimi 104, 173 à 175, 190, 206
Dogondoutchi 23, 46, 197
Dogon Kirya 186
Dosso 28, 96, 157, 170, 172, 182, 197

Echinochloa stagnigna 157
Edikel 107
Eghazer wan Agadez 21, 23, 25 à 28, 42, 45, 51, 53, 54, 65, 68, 70, 75, 76, 78, 79, 83, 84, 86, 87, 89 à 93, 95, 99, 103, 104, 107, 110, 119, 120, 121, 124, 125, 127 à 131, 133, 134, 147, 150, 157, 159, 160, 163, 165, 166, 177, 178, 181, 183 à 185, 187 à 189, 200, 206, 207, 209, 211, 213, 214
Eghazer (argilites de l') 45, 75, 83, 86, 100, 105, 107, 131, 187, 200, 209
Ekrafane 102, 103, 199
Erari 168
Erawen Zegiran 189

Fabiji 190, 193, 194, 197
Fagoshia 89, 150, 189
Faguibine (lac) 105
Fakara 23
Farak (série de) 46, 107, 162
Farey 172
Ferlo 178, 201
Filingué 28, 37, 38, 46, 96, 104, 157, 186, 190
Fogha 55

Gao 180
Gaya 170, 197
Gobir 186
Gorubi 41
Goruol 41

Haute-Volta 51
Hyphaene thebaica 54, 119, 180, 193, 195

Idukal n'Taghes 41
Imanan 56
Imuraren 56, 79
In Abangharit 21, 23, 41, 56, 109, 122, 125, 184, 188
In Asaka 198
In Ates 126
Indika 190, 191, 198, 206
In Gall 25, 45, 46, 75, 79, 80, 83 à 86, 127, 137, 139, 156, 200
In Jitan 189
In Kutayan 164, 165, 186
In Tazar 83
In Teduq 129
In Waggar 184
Irayen 121
Iullemmeden (bassin des) 41, 42, 45 à 47, 49, 51, 55, 105
Izadelagan 83, 129, 136, 139, 147
Izegwandan (série d') 45

Jurassique 45

Kahal Mentès 145
Kahal Midal 145
Kahal Sessao 145
Kainji 105
Kano 180
Kao 183
Kebbi 186
Kerbubu 80, 83, 91, 121, 151 à 156, 188
Kiota 170, 171

Libye 59
Liptako-Gurma 42, 45

Maerua crassifolia 54, 150, 152, 154, 162
Majiya d'Illela 186
Majiya de Malbaza 186
Mali (Etat) 26, 65, 66, 68, 120, 126, 180
Manga 180
Mardi 53
Marandet 125, 200
Matankari 172
Menaka 46, 126
Mentès 100, 105, 125, 145
Midal 145
Mogger 183

Namurien 45
Néolithique 27, 92, 124, 207
Niamey 99, 103, 123, 173, 175, 180 à 182, 197
Niger (Etat) 26, 29, 40, 42, 51, 54, 55, 65, 66, 68, 70, 109, 120, 178, 197
Niger (fleuve) 21, 23, 41, 42, 46, 51, 56, 65, 78, 93, 105, 107, 125, 157, 180, 183
Nigeria 59, 186, 198

Ouagadougou 180

Panicum turgidum 54, 154, 160, 162, 168
Pennisetum mollissimum 161
Pléistocène 54
Précambrien 42
Prosopis africana 54

Sahara 52, 119
Sakamar 188
Sanam 183
Schoenfeldia sspp 154
Schouwia thebaica 54
Sekiret 23, 79, 83, 86, 91, 121, 128, 160, 181, 188, 189
Sénégal (Etat) 178, 180
Sénonien 46
Sessao 100, 105, 125, 145
Shibinkar 86, 89
Shi Kulenin 149
Shi Walemban 41, 149, 183, 184
Sirba 41
Sokoto 157
Solomi 181
Sorghum aethiopicum 54
Suggarien 42

Tabala 41, 56
Tabalak 183
Tabotakit 190, 192, 193
Tabzagor 128
Tadarast 26, 41, 54, 83, 102, 109, 121, 122, 135, 137, 149, 150, 161, 165, 177, 178, 180, 183 à 185, 200
Tadben 121
Tadbuk 184
Tadist 23, 101, 149, 186
Tafadeq 45
Tagazar 56
Tageyt 187
Tahoua 28, 39, 46, 95, 96, 128, 200
Tajinjer 126, 144, 145, 190, 193
Takanamat 183, 198
Takedda 26
Tal 109
Tamanrasset 200
Tamesna 21, 26, 51, 70
Taralesh Ralesh 198
Tasara 125, 129
Tasedet 188
Tawarde 86, 128
Tazerzaït 100, 101, 105, 109, 126
Tchad (lac) 51, 105, 180
Tchin Tabaraden 28, 95, 96, 101 à 103, 122
Tebangant 75
Tegama 127
Tegama (grès du) 45, 46, 76, 83, 84, 91, 107, 128, 129, 135 à 139, 161, 162
Tegidda n Adrar 28, 45, 80, 128, 154, 188
Tegidda n Tageyt 76, 107, 188
Tegidda n Tesemt 25, 55, 70, 75, 76, 83, 86, 184, 188, 189, 200
Teleginit 45, 75
Telwa 23, 152, 154, 184, 188
Telwa (grès du) 45
Tende 201
Ténéré 109, 110, 121
Termit 180
Tiegubay 130, 131, 134, 135, 185
Tigerwit 75, 177, 181, 183, 200
Tigezefen 21, 23, 46, 51, 190
Tigidit 23, 41 à 43, 54, 75, 80, 83, 84, 86, 90, 109, 120, 121, 127 à 129, 137, 139, 141, 177, 184, 185
Tilemsi 41

Tillaberi 173
Tillia 101, 125, 126, 206
Timmersoï 21, 41, 188
Tin Drarin 127, 129, 141, 142, 193
Tin Jekoda 166, 167, 186
Tirhahart 109
Tribulus terrestris 54
Tukunus 190
Tuluk 187, 188
Tyeral 110, 113, 114, 147

Westphalien 45

Zgaret, voir Azagaret
Zigi 23
Zinder 75, 109, 200
Ziziphus mauritiana 150

ILLUSTRATIONS COULEURS

Figure 69 - AZELIK CANAL 6, scène 204-048, vue du 12.01.76, photographie d'écran Péricolor :

Du plus brillant au plus absorbant,

– en rouge (niveaux 65 à 127) : sables dénudés, sables à couverture herbacée sèche dense (tazmey) ;

– en jaune (57 à 64) : sables à couverture végétale discontinue mais marquante : touffes de Panicum turgidum et ligneux épars, plaques caillouteuses discontinues ; argiles claires, lisses, réfléchissantes ;

– en vert (48 à 56) : argiles diverses, plus ou moins craquelées et pulvérulentes, plus ou moins recouvertes de cailloutis, piétinements ça et là ; regs peu vernis où le quartz domine ;

– en bleu (42 à 47) : argiles sombres ou fortement craquelées des bas-fonds de la vallée de l'Eghazer wan Agadez, regs vernis ;

– en bleu foncé (moins de 42) : argiles très sombres et très craquelées (montmorillonites caractéristiques), cailloutis vernis des regs en position sommitale ou particulièrement denses.

Figure 70 - AMUMUN CANAL 7, scène 204-048 du 12.01.76, photographie d'écran Péricolor :

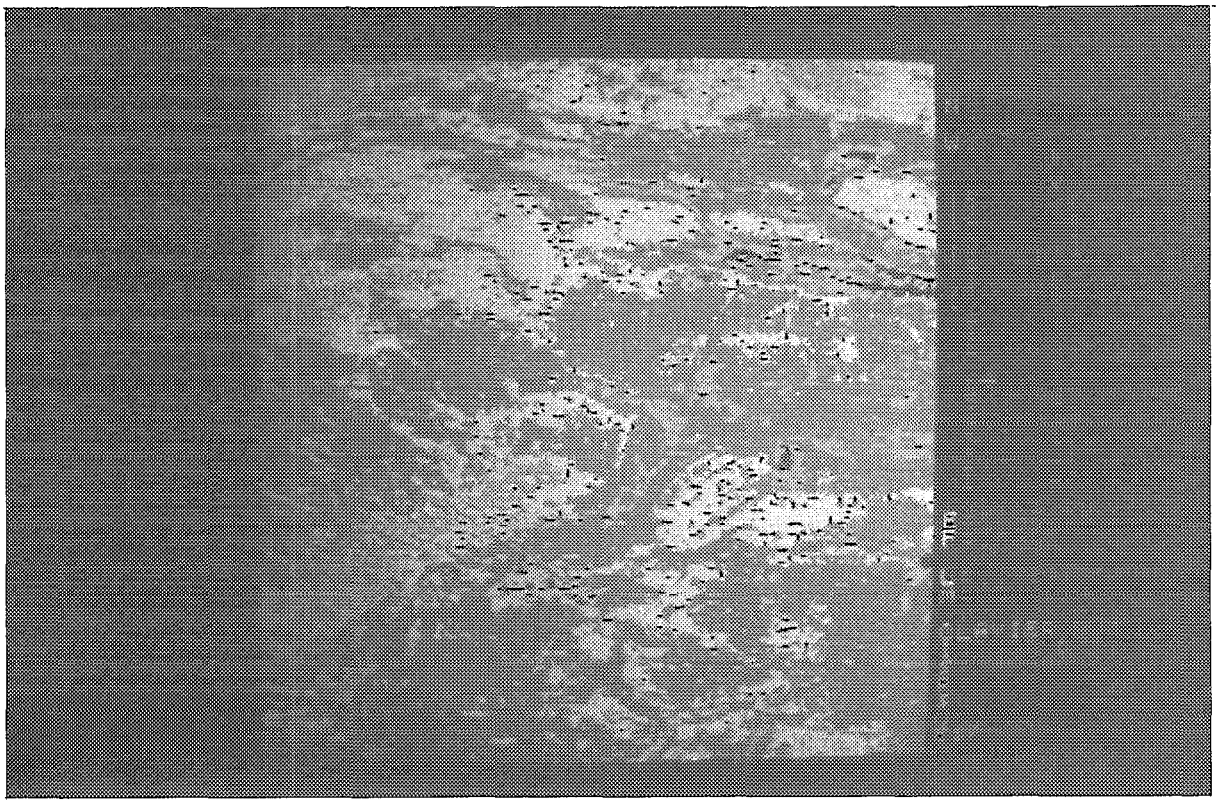
Du plus brillant au plus absorbant :

– rouge clair - orangé (26 à 127) : prairie tazmey, sables nus ou peu couverts d'herbe sèche ;

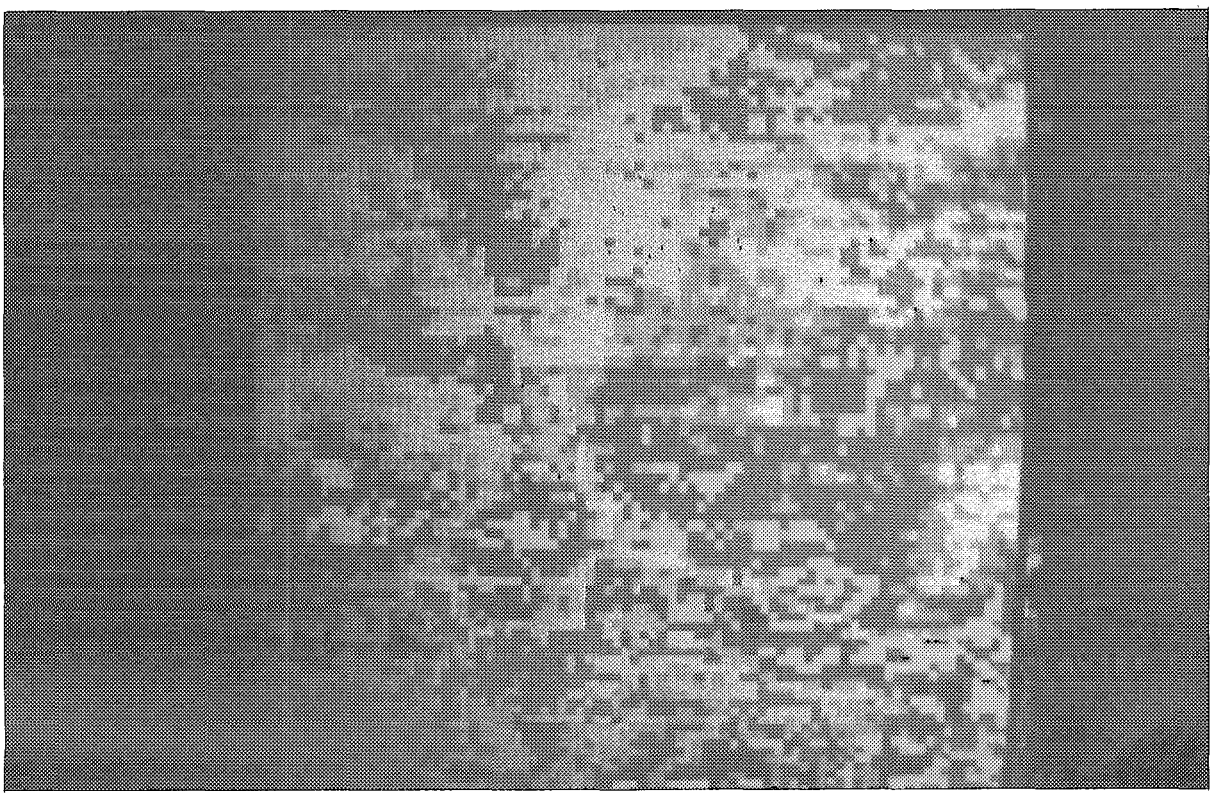
– rouge foncé (24 et 25) : sables à végétation marquante (Panicum turgidum et ligneux), sables plus ou moins parsemés de cailloutis, argiles claires et lisses ;

– jaune à vert foncé (22 et 23, 21, 19 et 20) : passage des argiles claires, peu craquelées et peu couvertes de cailloutis aux argiles sombres et craquelées, aux cailloutis denses et sombres ;

– bleu clair et bleu foncé (15 à 18) : regs vernis (plus sombres sur les parties sommitales).



69



70

Figure 71 - AGALAMLAM EST, scène 206-049 vue du 19.02.76, image partielle, composition colorée photographique.

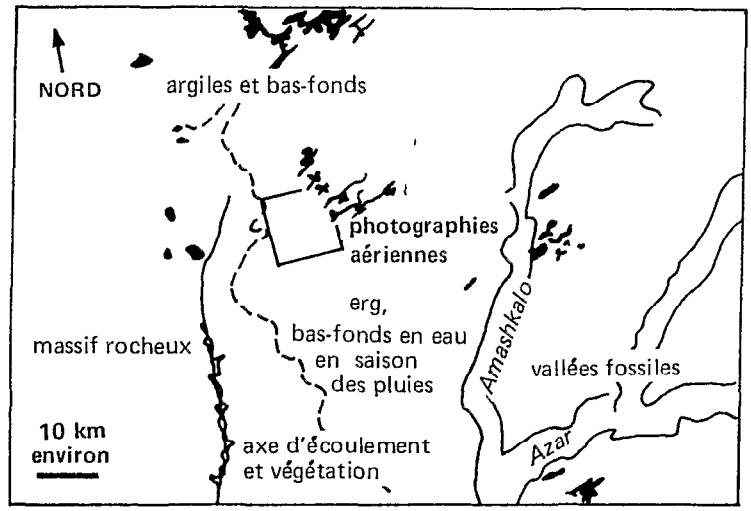
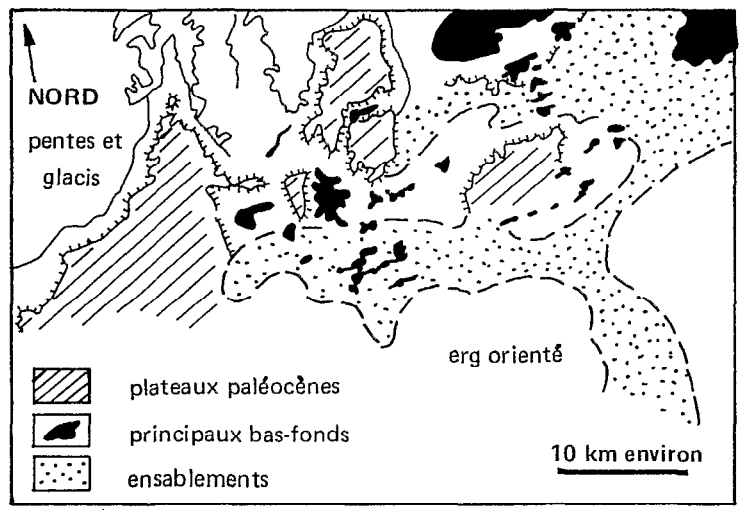
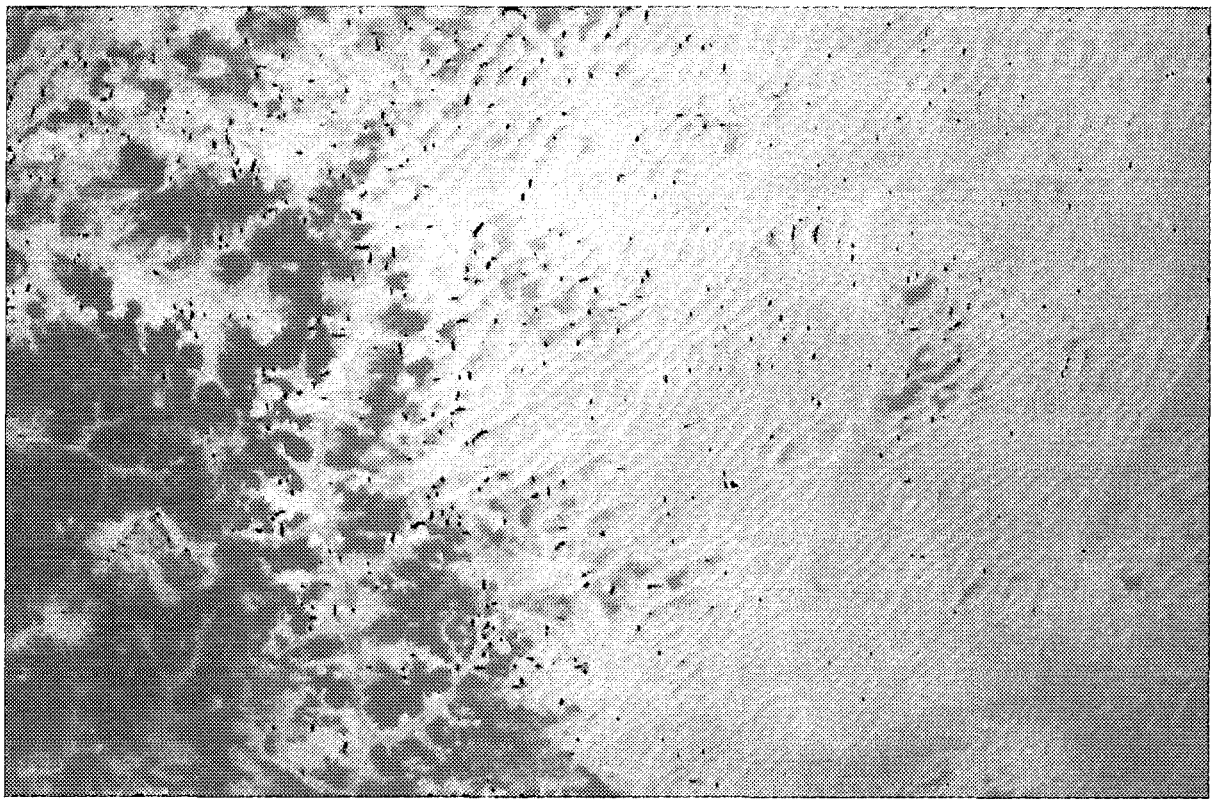
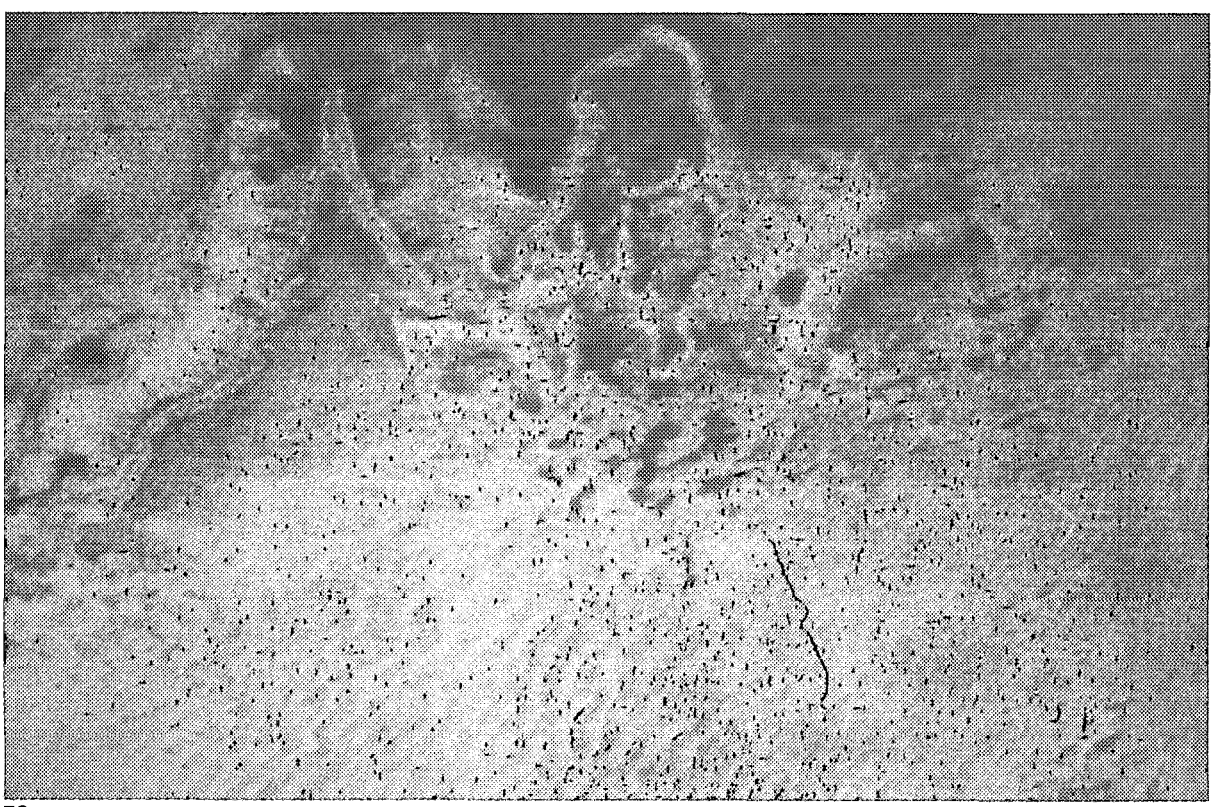


Figure 72 - TAJINJER, scène 206-048 vue du 26.03.76, image partielle, composition colorée photographique.





71



72

Figure 73 - SPOT AGA NORD, composition colorée numérique de simulation Spot, zone nord du secteur enregistré (région d'Agadez), photographie d'écran Péricolor :

Les regs, tous vernis surtout sur les pentes apparaissent en gris, les sables en jaune clair, la végétation va de l'orange au violet. Au centre, la vallée du Tyeral et son « barrage » sableux.

Figure 74 - KERBUBU CANAL 5, scène 204-048, vue du 12.01.76, photographie d'écran Péricolor :

L'aire forestière, dans les tons de bleu et de vert, traverse l'image à peu près en son milieu ; du plus sombre au plus clair,

– Noir (28 à 37) : partie la plus absorbante de la forêt : activité chlorophyllienne des ligneux en formations denses ou à feuillage sombre (Acacia raddiana), jeunes arbres (Acacia ehrenbergiana) et buissons (Boscia senegalensis) en formations jointives, proches des axes d'écoulement de la nappe d'inféroflux ;

– Bleu foncé (38 à 44) : ligneux en formations denses, Acacia ehrenbergiana remplace Acacia raddiana ;

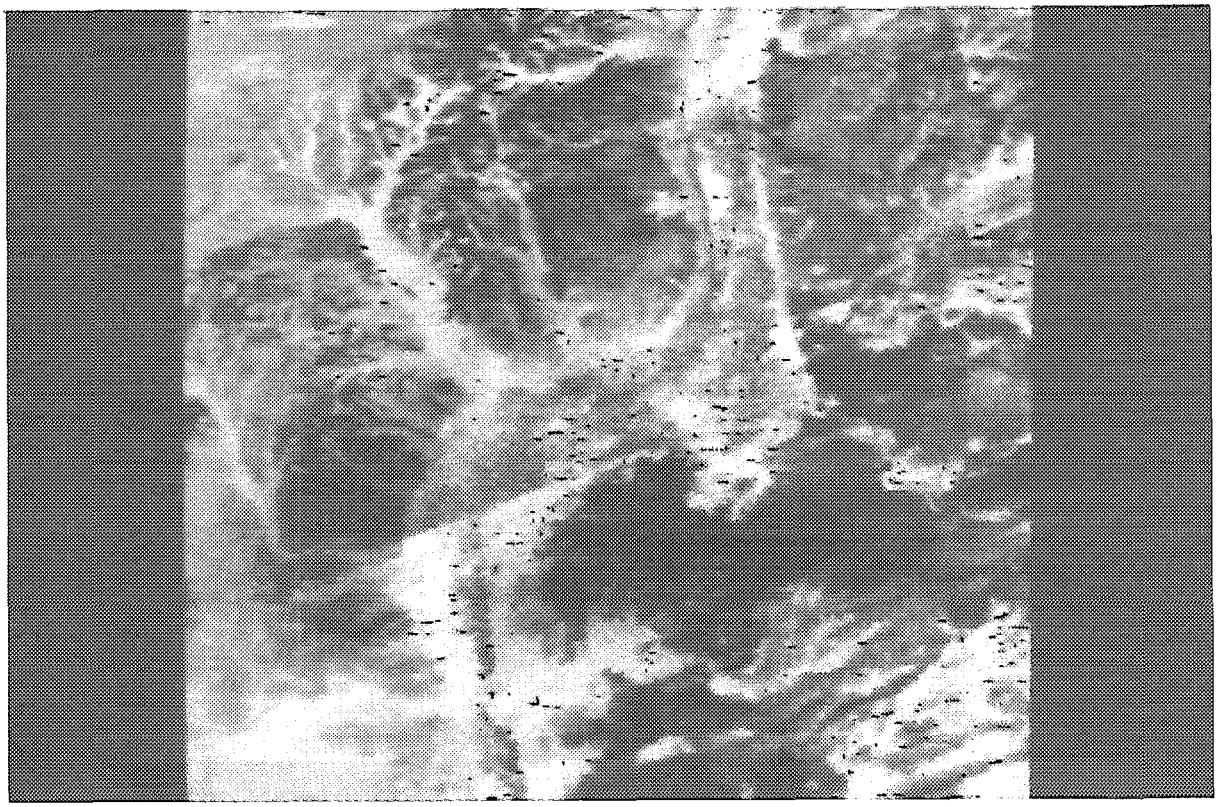
– Bleu moyen (45 à 47) : frange forestière, arbres moins denses, moins densément feuillus, plus éloignés de l'alimentation régulière en eau ; présence de sables dénudés (petites dunes vives) éclaircissant les masses arborées ;

– Vert (48 à 57) : Acacia ehrenbergiana non jointifs, frondaisons peu actives, éloignement de la nappe ;

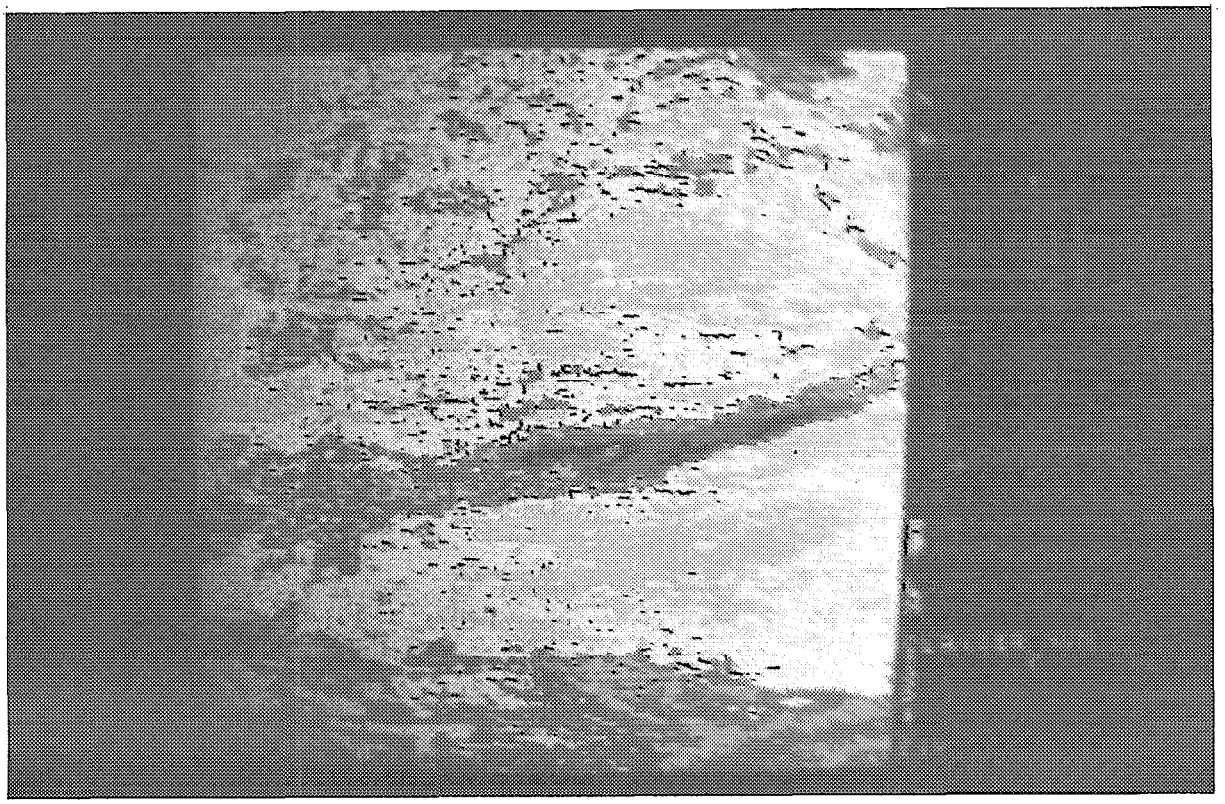
– Jaune et rouge (54 à 58, 59 à 127) : formations sableuses environnantes sur la formation des grès d'Agadez, couvert discontinu de Panicum turgidum et d'Aristida diverses, Acacia ehrenbergiana rare et dispersé ; en rouge : sables dénudés ou quasi-dénudés, formations d'Aristida denses.

On remarque, à l'ouest de la zone forestière, l'éventail divergent des écoulements temporaires souligné par la végétation (en bleu et en vert), écoulements actuellement non fonctionnels et invisibles sur le terrain.

Les masses bleues situées au nord, au nord-ouest et au sud de la bande forestière sont des argiles sombres et des regs vernis.



73



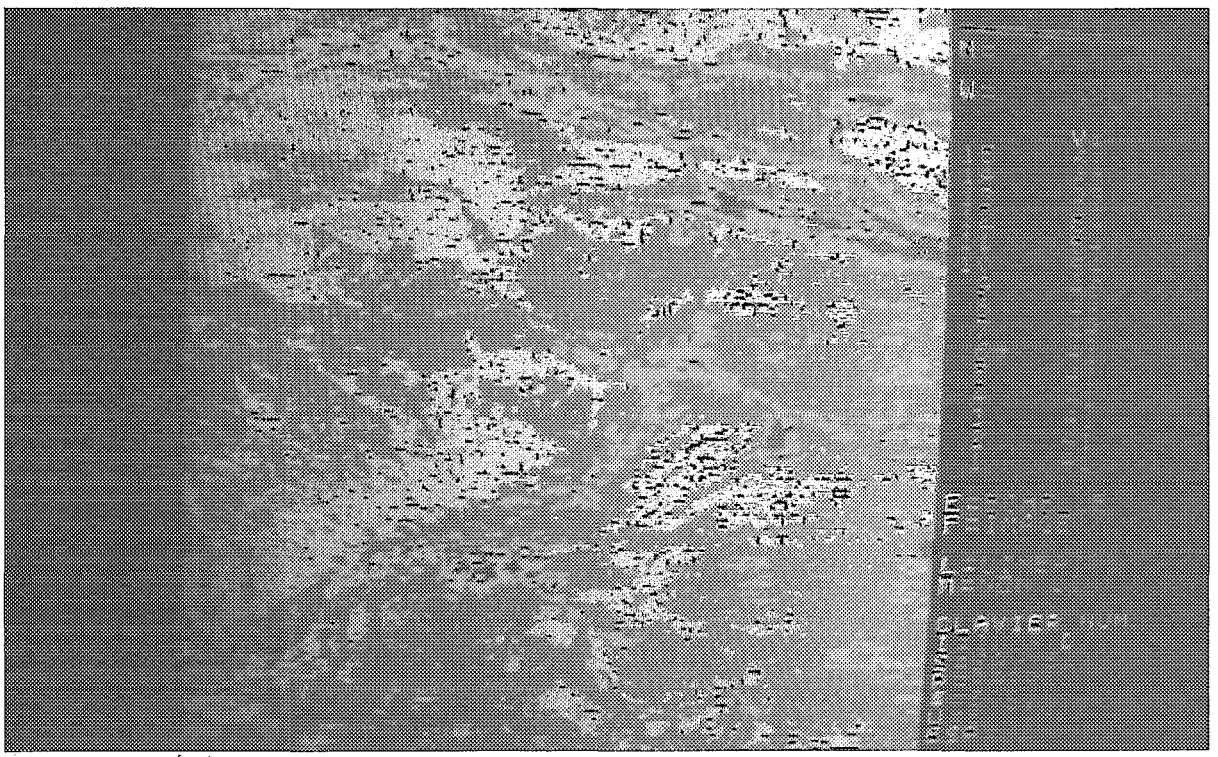
74

Figure 75 - AZELIK CANAL 5, scène 204-048, vue du 12.01.76, photographie d'écran Péricolor :

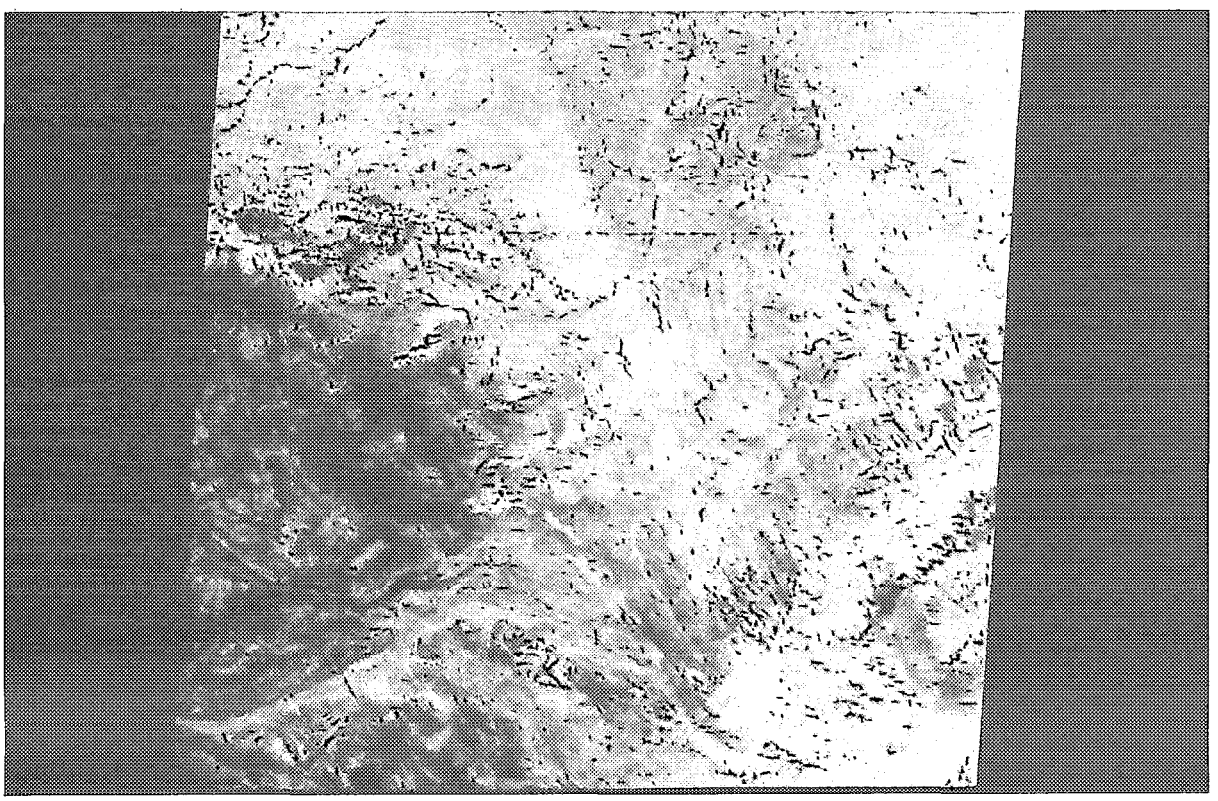
- rouge (62 à 127) : sables nus, végétation très réflectante tazmey, argiles nues, lisses et brillantes ;
- jaune (54 à 61) : sables couverts de végétation discontinue et argiles claires sans couverture caillouteuse ;
- vert (46 à 53) : argiles et cailloutis « moyens », pas de végétation ;
- bleu clair et bleu-noir (41 à 45 et moins de 40) : argiles très sombres et regs vernis, pas de végétation.

Figure 76 - Scène 205-048 entière, composition colorée photographique :

A l'est, la partie occidentale des argilites de l'Eghazer, de réflectance très basse, bordées par la vallée de l'Eghazer wan Agadez dont le « delta » terminal est bien visible. On remarque le contact rectiligne entre les formations du Tegama proprement dites, claires, et celles de la série de Farak, très absorbantes dans le canal 5. La vue est partiellement ennuagée.



75



76

Figure 77 - IN KUTAYAN et TIN JEKODA, scène 206-049 vue du 19.02.76, image partielle, composition colorée photographique.

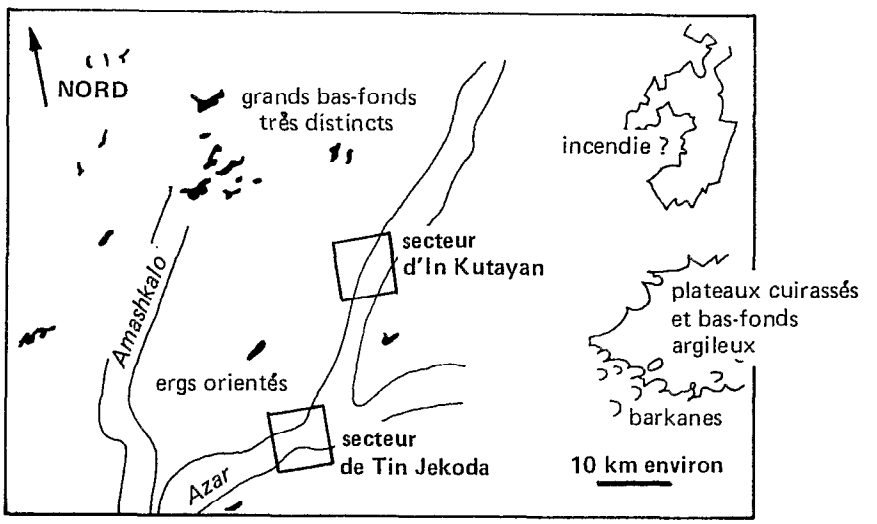
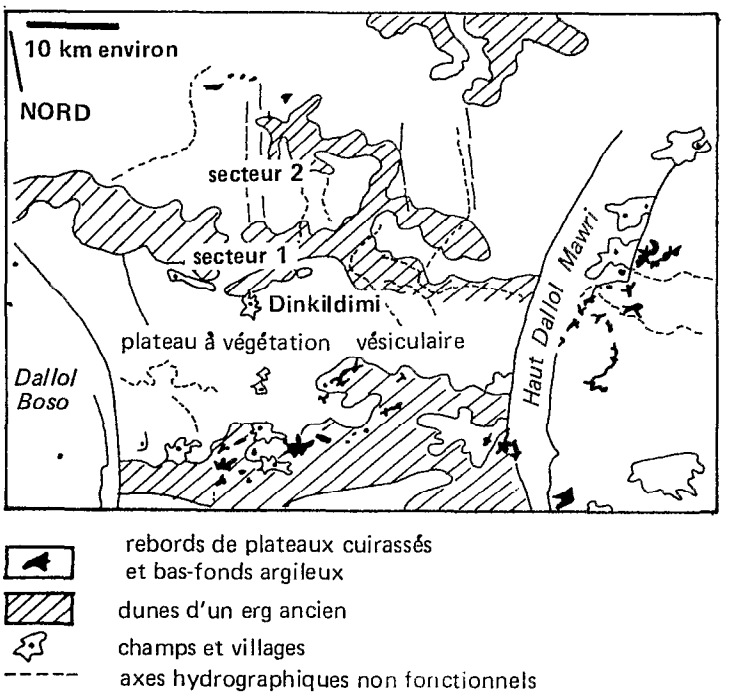
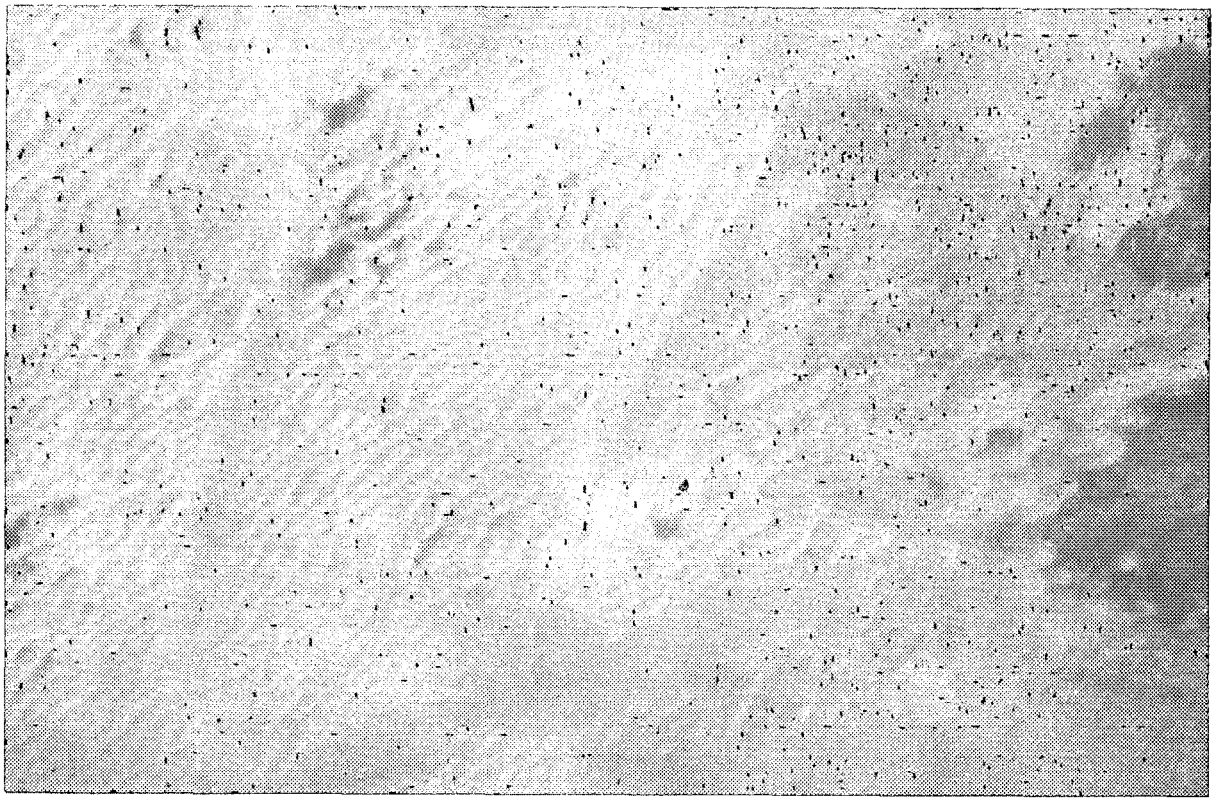
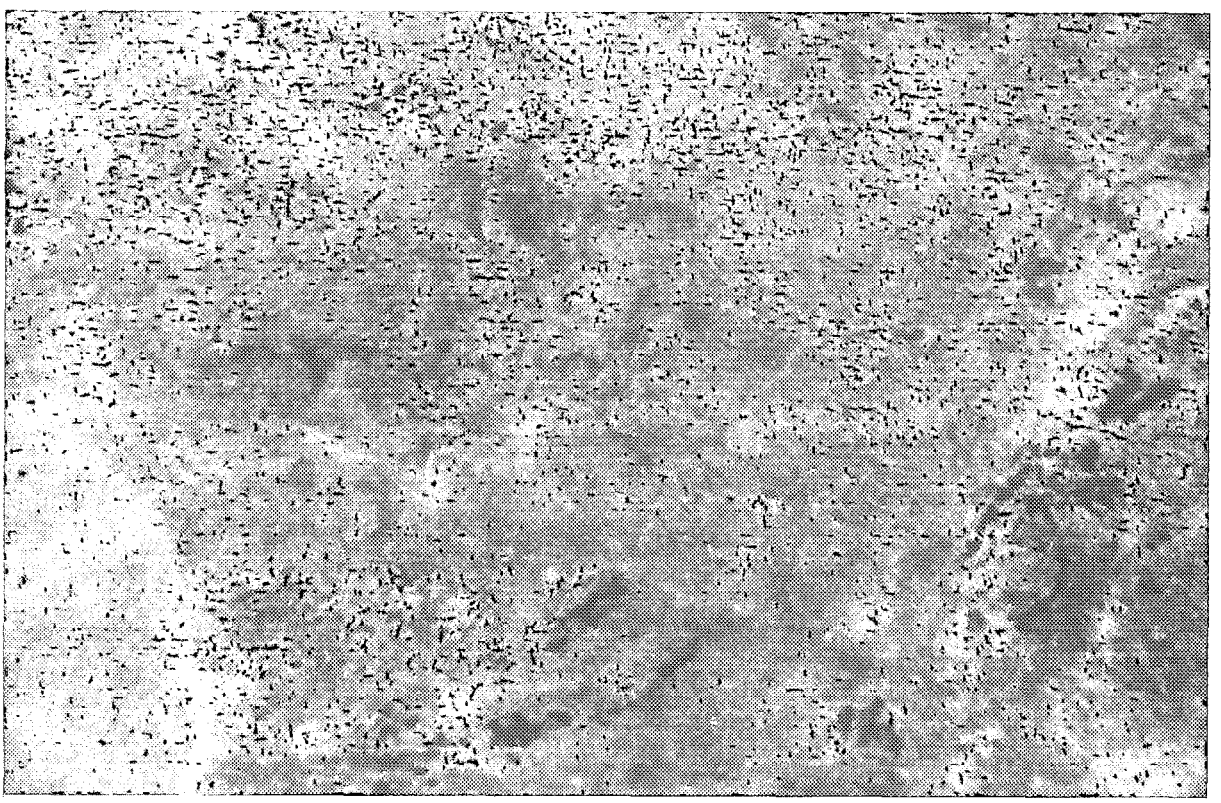


Figure 78 - DINKILDIMI, scène 206-050 vue du 26.03.76, image partielle, composition colorée photographique.





77



78

Figure 79 - INDIKA et TABOTAKIT, scène 206-050, vue du 26.03.76, image partielle, composition colorée photographique.

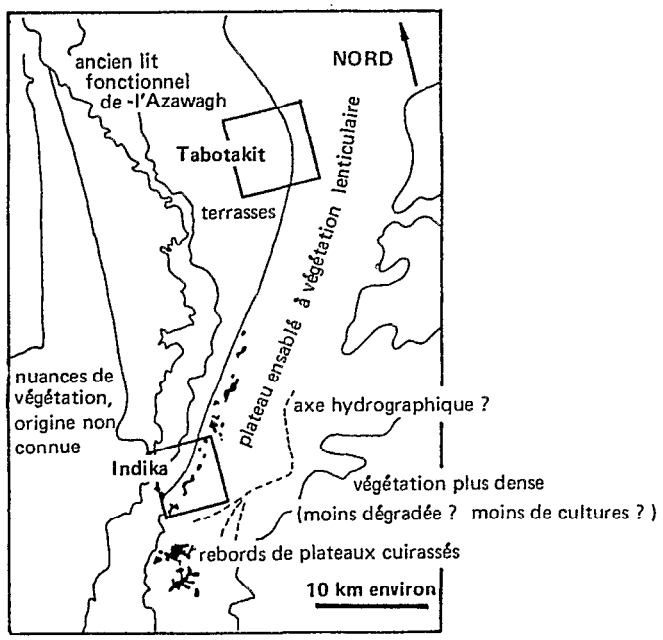
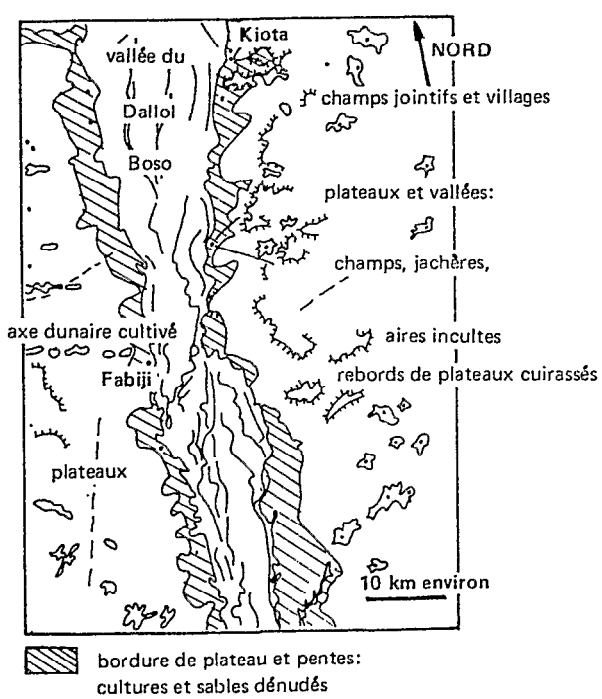
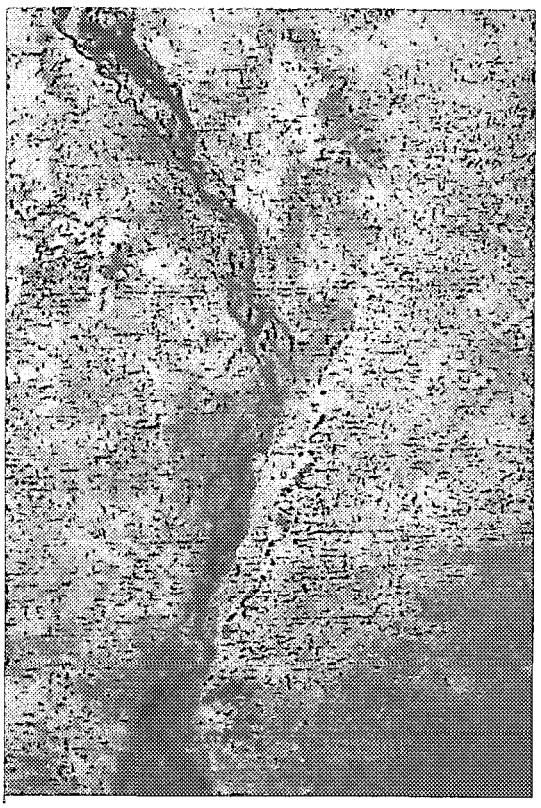
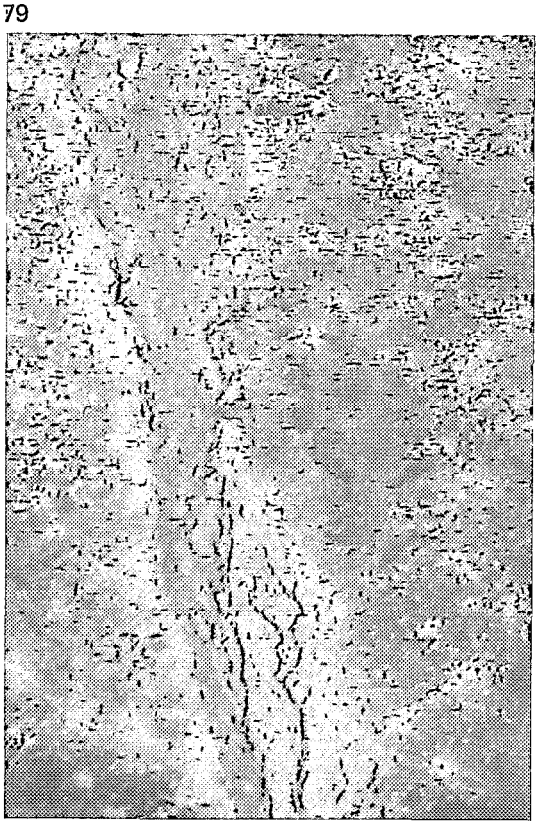


Figure 80 - KIOTA et FABIJI, scène 206-051, vue du 26.03.76, image partielle, composition colorée photographique.





79



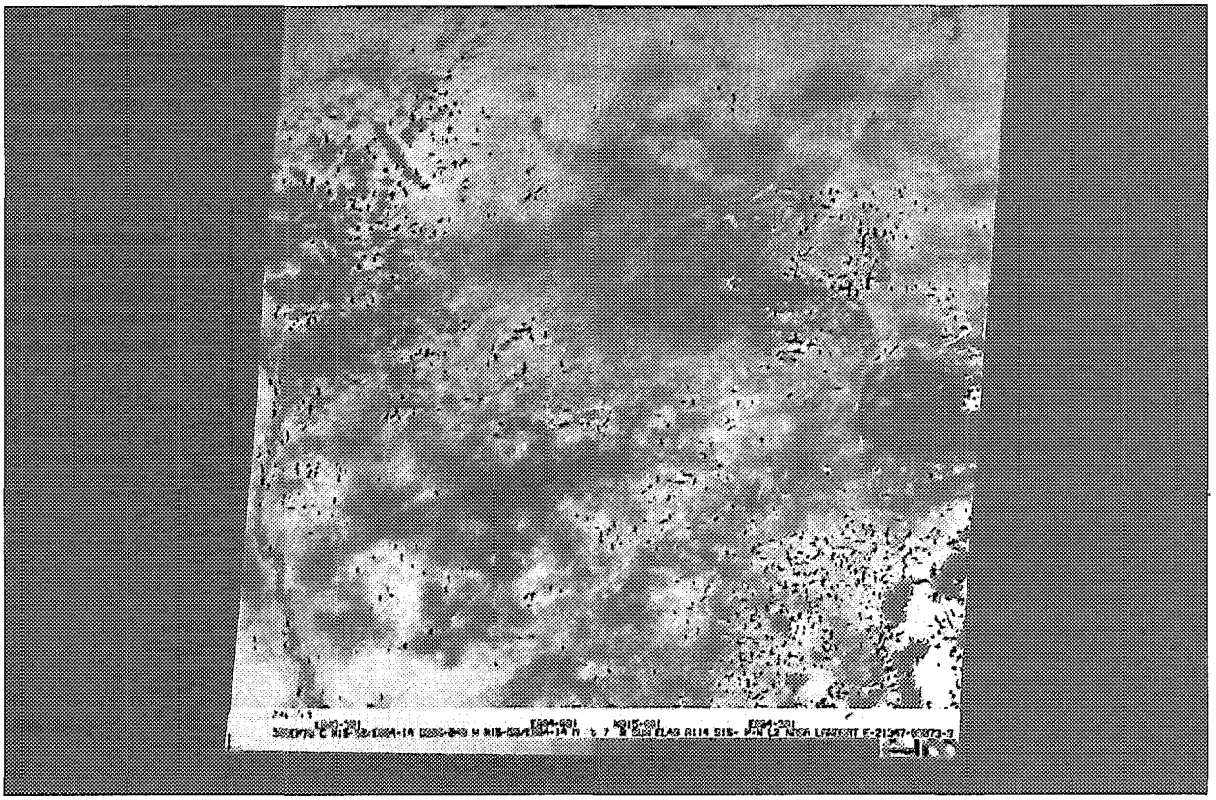
80

Figure 81 - Scène 206-049 entière, composition colorée photographique :

Le massif d'Agalamlam et la vallée de l'Azawagh sont à l'ouest. La vue du 30 septembre 1978 montre de nombreuses petites surfaces en eau et un ennuagement notable sur les pourtours de la scène.

Figure 82 - Scène 206-051 entière, composition colorée photographique :

Successivement, d'ouest en est, la vallée du Dallol Boso et son confluent avec le fleuve Niger (à l'extrême sud), les vallées affluentes locales du Dallol Mawri et le Dallol Mawri proprement dit, la vallée de la Sokoto River (en Nigeria). Ici comme précédemment, les surfaces couvertes de végétation dense plus ou moins homogène des plateaux contrastent avec les espaces cultivés (dénudés au moment de l'enregistrement) très clairs.



81

82

ORSTOM Éditeur
Dépôt légal : 4e trim. 1986

Légende de la carte de reconnaissance physiographique de l'Azawagh.

1. Sables plans et sables dunaires plus ou moins couverts de végétation, ergs réticulés à bas-fonds de taille moyenne (de l'ordre du kilomètre de diamètre).
2. Ergs réticulés à grands bas-fonds interdunaires (de l'ordre de trois kilomètres) non indivudalisés sur la carte.
3. Formations complexes liées à la cuesta cénomano-turonienne :
   3 a. Sables à végétation importante sur la *série de Farak*
   3 b. Formations argileuses à très grands bas-fonds inondables.
4. « Terres nues », formations argileuses et caillouteuses en relief de la cuesta cénomano-turonienne (plateau de Tazerzaït).
5. Grandes dunes circulaires sur substratum argilo-gypseux de la région de Tillia.
6. Plateaux caillouteux, regs dépourvus de végétation.
7. Sables parsemés de pointements rocheux et de buttes non individualisées.
8. Bancs calcaires, marneux et gypseux de la cuesta sénonienne-paléocène (région de Sessao et Mentès).
9. Bas de pente et glacis argileux, argilo-sableux et caillouteux.
10. Cuirasses recouvertes de végétation des plateaux du Continental terminal :
    10a. Brousse tigrée « classique »
    10b. Végétation dense résiduelle
    10c. Plateaux cuirassés de l'Ader.
11. Milieu hydromorphe actif de la vallée du fleuve Niger (rizières et pâturages inondables).
12. Hydrographie actuelle et sub-actuelle :
    12a. Eau libre
    12b. Argiles sombres de bas-fonds inondables ou anciennement inondables, montmorillonites de néo-formation.
    12c. Végétation dense des fonds de vallée alimentée par nappe d'inféroflux.
13. Milieu alluvionnaire de l'Azuz et de l'Azar.
14. Milieu alluvionnaire de l'Azawagh et des dallols
15. Milieu alluvionnaire de l'Azawagh, variante : confluent avec l'Azar ?
16. Milieu alluvionnaire du haut Dallol Mawri
17. Plateaux ensablés à végétation vésiculaire, brousse tigrée présumée dégradée
18. Idem, variante : éléments « végétation » de la texture plus petits.
19. Aires cultivées minoritaires, éparses ou peu visibles, non individualisées au milieu de la végétation spontanée dominante (aires non défrichées et jachères).
20. Aires cultivées éparses et jachères nombreuses de la périphérie des terroirs ; aires non exploitées minoritaires.
21. Dunes cultivées d'un erg ancien.
22. Indices de dégradation du couvert végétal d'origine présumée anthropique et anomalies non expliquées :
    22a. Périmètre non expliqué (plantations ?)
    22b. Aires incendiées probables
    22c. Défrichements et cultures présumés récents (en 1976).
23. Terroirs entièrement cultivés chaque année à proximité des villages, sables nus des champs préparés.
24. Sables nus ou peu couverts des bas de pente et des épandages alluvionnaires et colluvionnaires actuels.

Une hiérarchie des figurations linéaires de la carte accompagne la légende :

25. Axes des alignements dunaires visibles.
26. Champs de dunes circulaires et de barkanes.
27. Linéaments non interprétés et divers (pistes, périmètres clôturés), axes hydrographiques indistincts.
28. Variantes de tracés relevées sur des vues Landsat différentes.
29. Tracés significatifs notés sur les cartes topographiques mais non visibles sur les images Landsat examinées.
30. Mise en évidence de la netteté de certaines limites.
31. « Lignes de végétation » séparant des ensembles inégalement denses ; position géographique variable.
32. Repères des scènes interprétées (vues de la « première série »).

ISSN : 0371-6023
ISBN : 2-7099-0818-2
Éditions de l'ORSTOM
70, route d'Aulnay F-93140 BONDY

Maquette : M.A. BRAY

AZAWAGH FEUILLE NORD

0 10 20 30 40 50 km

6
12

25
26
27
28
29
30
31
32

Y. PONCET 1983

AZAWAGH FEUILLE CENTRE

6
10a
10c
12
20

25
26
27
28
29
30
31
32

0 10 20 30 40 50 km

Y. PONCET 1983

AZAWAGH – FEUILLE SUD

RCP 322 - Y. PONCET

CARTE DE RECONNAISSANCE PHYSIOGRAPHIQUE DE L'AZAWAGH

EN 3 FEUILLES

6
10a
10b
10c
12
20
22a
23

25
26
27
28
29
30
31
32

0 5 10 15 20 25 km

Y. PONCET 1983

Cette mire doit être lisible dans son intégralité
Pour A0 et A1: ABERPFTHLJDOCGQUVWMNSZXKY
zsaeocmuvnwxirfkhbdpqgyjlt 714 2385690
Pour A2 A3 A4: ABERPFTHLJDOCGQUVWMNSZXKY
zsaeocmuvnwxirfkhbdpqgyjlt 714 2385690

GAM-T-12
N° 60 073 DMT