

INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES  
C.I.E.H.

# QUATORZIEME REUNION DU CONSEIL DES MINISTRES

OUAGADOUGOU 9 - 18 FEVRIER 1988

## COMPTE RENDU DES JOURNEES TECHNIQUES

TOME 3

ATELIER 3 : CARTOGRAPHIE ET TELEDETECTION



COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES  
C.I.E.H.

QUATORZIEME CONSEIL DES MINISTRES  
OUAGADOUGOU 9 - 18 FEVRIER 1988

---

COMPTE RENDU DES JOURNEES TECHNIQUES

(COMMUNICATIONS)

ATELIER 3 :

CARTOGRAPHIE ET TELEDETECTION

15N 4245  
71 CIEH88

OUAGADOUGOU

Avril 1988

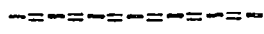
-/-) V E R T I S S E M E N T

Les opinions formulées dans les communications  
ci-jointes ne représentent pas forcément la position du  
Secrétariat Général du Comité Interafricain d'Etudes  
Hydrauliques et ne saurait engager la responsabilité de  
celui-ci.

Le Secrétaire Général

// OMMAIRE  
-----

	<u>Pages</u>
Avant Propos.....	1
I. SYNTHÈSE DE L'ATELIER.....	2
II. RÉSUMÉ DES TRAVAUX.....	4
III. COMMUNICATIONS.....	16
1. Exposé introductif sur la cartographie et la télédétection (J.P. VINTER, CIEH).....	17
2. Cartographie à moyenne échelle - Présentation Générale des cartes aux échelles moyennes (1/1000.000 et 1/500.000) traitant des ressources en eau en Afrique (SAFAR Zitoun, AAC).....	21
3. Présentation de la feuille de l'Afrique du Nord-Ouest de la carte hydrogéologique Internationale de l'Afrique Résultats et analyse (SAFAR Zitoun, AAC).....	31
4. La carte de potentialité des ressources en eau souterraine de l'Afrique Occidentale et Centrale (J.L. HENRY, Géohydraulique - SOGREA et B. MOUSSIE, BRGM).....	52
5. Applications du système de cartographie assistée par micro-ordinateur ARC/INFO pour les études des ressources en eau exécutées dans les pays en voie de développement (R.J.M. GUNST, IWACO).....	59
6. Gestion des ressources en eau du Niger structure et développement de l'information des ressources hydrauliques (G.M. SAVARY, MRAIH - DRE).....	68
7. Formation continue à l'utilisation des méthodes géophysiques pour la recherche de l'eau. Une expérience récente Mali - Niger (D. CHAPPELLIER, Université de Lausanne).....	76
8. L'Institut Géographique du Burkina - Activités et perspectives (I.G.B.).....	88
9. Applications de la télédétection pour l'évaluation des ressources en eau souterraine en Afrique (J. PARNOT, CRTO)...	91
10. Interprétation des images satellitaires SPOT et cartographie des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols sur un bassin versant sahélien : le bassin versant de la mare d'Oursi - Burkina Faso (J.M. LAMACHERE, ORSTOM).....	106
11. Reconnaissance de la pluviométrie en zone intertropicale - Tentative de Télédétection - Application à la région de Ouagadougou. (J.P. CARBONNEL - CNRS/PARIS VI).....	125
IV. LISTE DES PARTICIPANTS.....	134
V. RECOMMANDATIONS ET RÉSOLUTIONS.....	136



.....  
.....  
Le 14e Conseil des Ministres du C.I.E.H. a été précédé des "Journées Techniques" qui se sont déroulées du 9 au 11 février 1988.

.....  
Les discussions techniques tenues à cette occasion ont permis d'évoquer des problèmes d'actualité sur les sujets suivants :

- Atelier n°1 : aménagements hydroagricoles
- Atelier n°2 : moyens d'exhaure
- Atelier n°3 : cartographie et télédétection.

Ces journées techniques ont été suivies d'une réunion des experts du 12 au 13 février 1988, au cours de laquelle ont été rédigées les recommandations de chaque atelier.

Les Ministres réunis au Conseil les 16, 17 et 18 février, ont retenu plusieurs de ces recommandations et émis des résolutions sur la base de celles-ci.

Le présent document rassemble les communications de l'atelier n°3 des journées techniques et traite exclusivement de la cartographie et de la télédétection.

Cet atelier était présidé par M. M. MOURI, représentant la S.E.E.G du Gabon, et avait pour rapporteur M.K. HODIN, chef du Service Hydrologique du Togo, et co-rapportent MM. TRIBOULET et VINTER, ingénieurs au CIEH. Il a réuni environ 60 participants venant des pays membres du C.I.E.H. et de nombreux organismes nationaux et internationaux.

Les communications relatives aux deux autres ateliers des journées techniques : Aménagements Hydroagricoles et moyens d'exhaure, ont également été éditées (Compte Rendu des Journées Techniques tomes 1 et 2).

## I. SYNTHESE DE L'ATELIER 3 : Cartographie et Télédétection

La restitution cartographique de l'environnement, qu'elle soit descriptive ou de synthèse, constitue une base de décision essentielle pour les techniciens, les projeteurs et les planificateurs.

Au cours de cet atelier, ont été présentées des expériences d'utilisation et exemples de réalisation mettant en oeuvre des techniques traditionnelles de cartographie hydrogéologique destinée aux spécialistes et des techniques nouvelles utilisant la conception assistée par ordinateur et la télédétection.

Les domaines présentés ont été les suivants :

- 1) Cartographie Hydrogéologique classique, présentée par l'Association Africaine de Cartographie (AAC) dans le cadre du Programme de Cartographie Hydrogéologique Internationale de l'Afrique (PCHIA), qui voit son premier aboutissement avec la publication en 1987 de la première épreuve : la feuille Afrique de l'Ouest au 1/5.000.000. La deuxième phase du programme sera la production d'une carte hydrogéologique à échelle moyenne pour chacun des Etats.
- 2) Cartographie des potentialités, des ressources en eaux couvrant au 1/5.000.000 vingt trois pays de l'Afrique Occidentale et Centrale (pays membres du C.I.E.H. et autres pays) dont la réalisation a permis l'élaboration d'une méthodologie assistée par ordinateur. La deuxième phase prévoit également par Etat, à moyenne et grande échelle l'élaboration de cartes thématiques destinées aux projeteurs et planificateurs.
- 3) Application d'un système de Cartographie Assistée par microordinateur pour les études des ressources en eau exécutées dans les pays en voie de développement.  

Ce système léger permet l'élaboration des cartes thématiques, destinées à des utilisateurs ciblés sur site décentralisé.
- 4) Structure et développement de l'information des ressources hydrauliques qui, à l'amont de la cartographie, permettent l'archivage décentralisé des données essentielles pour la prise de décision concernant la situation hydraulique d'un territoire. L'établissement d'un atlas par unité administrative sera illustré par la production de cartes simples synthétisant les possibilités hydrauliques et les besoins.

- 5) Rôle de la formation dans l'approche cartographique, abordée à travers une expérience de formation continue pluri-annuelle rassemblant des spécialistes de disciplines différentes, appliquée à la géophysique.
- 6) Rôle des institutions de cartographie nationales produisant les fonds topographiques de base, présenté à travers l'expérience de " l'Institut Géographique du Burkina" qui a affirmé sa volonté de collaboration pour l'établissement de cartes thématiques avec d'autres institutions spécialisées.
- 7) Application de la télédétection pour l'évaluation des ressources en eau qui permet de donner une dimension régionale aux études hydrogéologiques, la mise en évidence de phénomène de subsurfaces par traitement d'images numérisées et une dimension temporelle aux paramètres évolutifs (économiques, climatiques ou hydrologiques).

La présentation des communications a donné lieu à des discussions techniques intéressantes et enrichissantes. A l'issue des débats, les participants ont proposé à l'attention de la Réunion des Experts et du Conseil des Ministres du CIEH, sous forme de recommandations, un certain nombre d'actions à entreprendre pour promouvoir le développement des activités liées à la cartographie hydrogéologique en Afrique et à l'utilisation de la télédétection dans le domaine des ressources en eau.

## II. RESUME DES TRAVAUX DE L'ATELIER 3

### 1. Présentation des études de cartographie hydrogéologique et de télédétection appliquée au domaine des ressources en eau actuellement en cours dans la sous-région.

#### 1.1. Introduction

La restitution géographique de l'environnement, qu'elle soit descriptive ou de synthèse, constitue une base de décision essentielle pour les techniciens, les projecteurs et les planificateurs.

Le CIEH a initié depuis plus de dix ans (1976 - 87) des opérations de cartographie hydrogéologique de planification avec le concours financier du Fonds d'Aide et de Coopération de la République Française et le concours financier du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Plus récemment (1986), il a contribué à la mise au point d'une nouvelle méthodologie de cartographie des potentialités assistée par ordinateur, avec le concours du BRGM/Géohydraulique sur financement de la Communauté Economique Européenne.

Le CIEH a également apporté son soutien technique au Programme de Cartographie Hydrogéologique Internationale de l'Afrique (PCHIA) en suivant toutes les étapes de ce programme qui voit son premier aboutissement avec la publication en 1987 de la première épreuve de la feuille Afrique de l'Ouest au 1/5.000.000.



En amont de la cartographie, le CIEH mène des études de conception de bases de données informatisées de points d'eau qui trouveront une utilisation directe non seulement en cartographie, mais aussi dans le domaine de la gestion des programmes d'hydraulique villageoise (planification, exécution et maintenance).

Dans le domaine de la télédétection, le CIEH a également fait le point sur les "Possibilités d'utilisation de la télédétection dans le domaine de l'eau en Afrique" (1986), en étroite collaboration avec le Centre Régional de Télédétection de Ouagadougou (CRTO), et entreprend actuellement, toujours avec le CRTO, une opération intégrant la télédétection dans des études hydro-agricoles dans la vallée du Niger.

Cet inventaire montre à quel point le CIEH se préoccupe de promouvoir les techniques de cartographie et de télédétection comme outil d'aide à la connaissance et à l'exploitation des ressources en eau de la sous région.

#### 1.2. Programme de cartographie hydrogéologique internationale de l'Afrique (PCHIA).

Les travaux de cartographie réalisés aux échelles moyennes (1/1 à 1/2 million) sont nombreux en Afrique et couvrent aussi bien le niveau national (16 pays, 25 % de la superficie du continent) que le niveau régional, essentiellement au nord de l'équateur. Les moyens mis en oeuvre sont variés, des moyens classiques aux nouvelles techniques informatisées.

Les cartes élaborées se regroupent en deux grandes familles selon leur orientation dominante :

- orientation scientifique (cartes régulières) qui a subi le principal effort de normalisation avec l'adoption en 1970 de la légende internationale des cartes hydrogéologiques (concours UNESCO/AIH/AISH).
- orientation pratique (cartes spécialisées) visant à fournir des informations élaborées directement utilisables, qui regroupent les cartes paramétriques s'adressant aux spécialistes et les cartes de messages qui ont pour but de communiquer l'aspect hydrogéologique aux non professionnels.

Dans ce contexte le PCHIA, initié par l'OUA et exécuté par l'Association Africaine de Cartographie (AAC), a les objectifs suivants :

- faire le point sur l'information
- réaliser des synthèses régionales sur les systèmes aquifères communs à plusieurs Etats
- créer un courant d'entraide africain au profit des pays les plus démunis
- normaliser et standardiser.

Le programme a pris naissance en 1969 avec la Décennie Hydrologique Internationale (UNESCO) pour l'Afrique du Nord, s'est progressivement mis en place au cours de différents grands forums sur l'eau et l'environnement, pour commencer ses réalisations en 1984 avec l'AAC. L'organisation du PCHIA repose sur une structure de coordination, un réseau africain de correspondants nationaux et un réseau d'institutions internationales spécialisées en hydrogéologie.

La voie à court terme du programme vise la production de la carte hydrogéologique au 1/5.000.000 dont la première feuille sur l'Afrique de l'Ouest vient de paraître en épreuve. Le programme de production des 4 autres feuilles s'étend jusqu'à la fin 1988. Cette carte régulière a la légende normalisée incluant un zoning hydrogéologique (5 ensembles) basé sur des critères structuraux, lithologiques et d'alimentation, et des éléments du climat, de l'hydrologie de surface, de qualité des eaux et d'hydrogéologie.

La voie à long terme, avec une cartographie à 1/1 million a pour objectif de dynamiser l'activité de cartographie des ressources en eau en Afrique par l'aide à la mise en place de programmes de cartographie, centres et banques de données, missions d'experts complémentaires.

### 1.3. Carte des potentialités des ressources en eau souterraines de l'Afrique Occidentale et Centrale.

Le BRGM a établi cette carte à l'échelle 1/5 million en collaboration avec Géohydraulique à la demande du CIEH sur financement de la CEE.

L'élaboration de cette carte a abouti à la conception d'une méthodologie basée sur la technique de cartographie assistée par ordinateur qui en fait un outil évolutif et révisable par l'acquisition de nouvelles données.

La carte couvre 23 Etats de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, et ne constitue qu'une première étape qui devrait aboutir à sa révision après réalisation des autres cartes à échelle moyenne pour chacun des Etats concernés.

La méthodologie utilisée est basée sur une synthèse combinatoire n'ayant pas été (mais pouvant être) pondérée de 3 facteurs, eux-mêmes combinés de deux descriptifs :

- accessibilité, synthèse de la profondeur d'accès à l'eau et du pourcentage de succès
- productivité, synthèse de la profondeur du niveau dynamique et du débit
- sureté, synthèse de la capacité régulatrice de l'aquifère et de la hauteur de recharge garantie (pluie efficace moyenne).

Le fond de cette carte a consisté en la détermination et la saisie par plage de 23 faciès correspondant à des natures et des comportements différents des réservoirs dont la détermination a été beaucoup plus fonction de la nature lithologique que de la notion classiquement utilisée de chronologie des formations géologiques.

Comme toute technique de cartographie assistée par ordinateur, les données de base relatives aux forages et les données graphiques ont été saisies en fichiers qui permettent des restitutions sélectives à différentes échelles sans distorsion.

La carte hydrogéologique du Bénin (1/500.000) illustre ce que peuvent être les cartes à échelle moyenne réalisées par la méthode au niveau des Etats - 46 unités hydrogéologiques et le traitement de 1800 ouvrages hydrauliques en ont permis la réalisation.

Le schéma de principe de la cartographie au niveau des Etats prévoit 3 niveaux d'informatisation :

- saisie des données et constitution de fichiers faisant appel à du matériel léger pouvant être décentralisé.
- constitution de bases de données et restitution sous forme de tableaux, d'annuaires et de cartes d'isovaleurs sur site central équipé de périphériques graphiques (compatibles).
- édition de cartes synthétiques en traitements combinatoires faisant appel à des matériels lourds et spécialisés (mini-ordinateurs).

La méthode permet donc une certaine souplesse pour satisfaire les utilisateurs, notamment en permettant de modifier les seuils des paramètres définissant les classes des indicateurs. La normalisation dans la saisie des données de base est nécessaire pour réaliser avec efficacité le programme sur un ensemble de pays. La notice de la carte est accompagnée à cette fin d'un canevas type répertoriant selon leur importance les paramètres issus de la réalisation des ouvrages.

#### 1.4. Application du système de cartographie assistée par micro-ordinateur ARC/INFO pour les études des ressources en eau exécutées dans les pays en voie de développement.

Le Bureau d'études IWACO (Pays-Bas) utilise un système géographique informatisé dans différentes études des ressources en eau et dans les grands projets d'hydraulique urbaine. Des applications ont été faites notamment en Egypte et dans les Emirats Arabes Unis, et la cartographie a été réalisée sur des systèmes informatiques aux Pays-Bas.

Dans un proche avenir plusieurs projets en Afrique et en Indonésie seront équipés de leur propre SGI. Parmi ceux-ci le Projet Bilan d'eau au Burkina Faso (Ministère de l'Eau) servira de projet pilote dans le domaine de la cartographie assistée par ordinateur. L'équipement informatique sera constitué d'un micro-ordinateur IBM PS/2 modèle 60 et des périphériques nécessaires pour un coût d'environ 13 millions F CFA incluant le logiciel ARC/INFO (USA, 4 millions F CFA).

Parmi les activités, seules les impressions des cartes définitives et les traitements cartographiques spéciaux devront être effectués à l'extérieur sur équipements lourds, les autres étant réalisables sur place. Les activités sont :

- acquisition des données techniques : hydrologie, hydrogéologie, pluviométrie, climatologie
- saisie de la base topographique à partir des cartes existantes dans des fichiers type dBASE III + et DATAFLEX et éventuellement d'images satellitaires numérisées, les données étant des points, lignes ou polygones
- traitements simples des données (conversion, corrections), traitements des données préalable à la cartographie, traitements cartographiques (combinaison de paramètres), calculs divers (superficies), et dessin des cartes de travail sur table traçante, préparation de fichiers pour l'impression.

L'application prévue au Burkina Faso a pour objectif l'établissement d'un Plan Directeur pour la gestion des ressources en eau du pays. Le programme par étapes permettra d'élaborer un plan évolutif en fonction de l'apport de nouvelles données acquises par l'étude des processus hydrologiques et hydrogéologiques et par la création d'un réseau piézométrique.

Les cartes de planification envisagées porteront sur des thèmes multiples tels que cartes des besoins en points d'eau en fonction de critères, cartes de prix de forages, etc.

#### 1.5. Structure et Développement de l'information des ressources hydrauliques.

Plusieurs pays de la sous-région s'engagent résolument dans la création de systèmes de collecte et d'archivage des données de leurs points d'eau à des fins de planification et maintenance. Tel est le cas du Niger qui, en 1986, a repris l'Inventaire des Ressources Hydrauliques (financement suisse) avec une nouvelle approche.

L'inventaire devrait fournir l'information de base pour l'édition par arrondissement d'un atlas de ressources hydrauliques qui soit un outil efficace pour la prise de décision concernant la situation hydraulique du territoire. Parallèlement s'effectue la mise en place d'un système informatique de données qui permettra une automatisation et une efficacité de plus en plus grande (financement FAC).

L'inventaire est en cours dans plusieurs départements du Niger. Celui de Niamey, commencé en 1986, a servi de base à la construction d'un test en vraie grandeur de la réalisation de l'atlas. Il s'agit d'un inventaire systématique de tous les points d'eau existants. Il consiste à visiter chaque village et chaque point d'eau pour permettre l'établissement de deux types de fiches contenant les caractéristiques :

- la fiche village (renseignements géographiques et données liées aux ressources)
- la fiche points d'eau (renseignements hydrogéologiques et données d'exhaure).

L'atlas comprend trois parties :

- une introduction rappelant l'essentiel sur la géologie, les eaux souterraines et de surface ainsi que le lexique
- les fiches pour chaque village inventorié qui résument les informations principales des inventaires de terrain.
- les cartes synoptiques qui permettent une vue d'ensemble de la situation de la région, besoins d'une part et profondeurs de l'eau d'autre part.

La production des fiches est actuellement semi automatisée. Les informations sont extraites des fichiers de l'IRH. Dans le futur, des traitements de données permettront de créer des documents de synthèse destinés à la gestion des ressources et à la planification des investissements. L'atlas est destiné à tous les décideurs de l'Administration à l'échelon national comme à l'échelon local.

Cet exemple illustre l'important travail de rassemblement des données à accomplir en vue de porter l'information au niveau requis et sous une forme facilement actualisable.

#### 1.6. Rôle de la formation dans l'approche cartographique

L'établissement des cartes hydrogéologiques est le fruit d'une collaboration entre plusieurs spécialistes de disciplines différentes : cartographie, hydrogéologie, géophysique, qualité des eaux, etc. En général, l'hydrogéologue a des notions de l'ensemble de ces disciplines, mais l'exécution des cartes relève d'une équipe de spécialistes qui n'ont pas toujours la même approche ni la même perception des données qu'ils manipulent, par exemple en ce qui concerne leur précision.

Parmi ces disciplines, la géophysique apporte des données sur la géométrie du réservoir, sur sa nature lithologique et sur l'évolution de ses caractéristiques.

Une expérience de cours de géophysique récemment menée pendant plusieurs années consécutives en Afrique (ENI/Mali) avec la coopération de l'Université de Lausanne (Suisse) a montré tout l'intérêt de cet enseignement destiné à des techniciens de formations de base diversifiées. Il est à espérer qu'une des conséquences de cette formation spécialisée amène les intéressés à prendre davantage en compte l'importance de la géophysique dans les banques de données de points d'eau en archivant systématiquement les résultats des campagnes de terrain.

#### 1.7. Rôle des institutions de cartographie

La cartographie thématique s'appuie nécessairement sur des fonds de cartes topographiques à des échelles diverses. Le rôle des instituts de cartographie apparaît donc comme fondamental dans le processus d'élaboration des cartes hydrogéologiques.

La disponibilité de cartes à échelles appropriées conditionne le choix des échelles des cartes thématiques. En conséquence il est nécessaire qu'une coopération étroite s'installe entre les producteurs et les utilisateurs.

Plusieurs pays de la région se sont dotés d'instituts spécialisés qui produisent aujourd'hui la documentation cartographique de base nécessaire au développement du pays : cartes topographiques, administratives, routières. Le Burkina Faso est au nombre de ceux-ci, et l'Institut Géographique du Burkina (IGB) est en mesure de réaliser un certain nombre de travaux au nombre desquels figure la prise de vue aérienne, la restitution des documents, et la cartographie. Actuellement les efforts sont concentrés sur la production de la carte topographique à l'échelle 1/50.000 dont 12 feuilles sont déjà parues.

L'IGB affirme aujourd'hui sa volonté d'accroître et de diversifier ses activités en direction de ses partenaires et des utilisateurs de ses services. La section informatique dont le noyau est déjà en place sera pleinement opérationnelle à la fin de l'année 1988. Il est à espérer que cet exemple soit suivi par d'autres Etats, et que la coopération inter-Etats s'intensifie dans ce domaine.

#### 1.8. Applications de la télédétection pour l'évaluation des ressources en eau souterraines.

La télédétection se présente comme un outil intéressant en hydrogéologie dans trois types d'opérations :

- détermination des régimes hydrogéologiques
- mise en évidence des aquifères superficiels
- recherche des eaux souterraines.

En ce qui concerne l'hydrogéologie, la télédétection permet de fournir des données sur les formations géologiques, les formations superficielles, les structures géologiques. En région de socle et dans les formations sédimentaires compactes, la ressource hydrogéologique est essentiellement liée à la fracturation. Les images satellites se prêtent plus particulièrement à l'analyse régionale.

La mise en évidence des aquifères superficiels est obtenue par les diverses observations possibles sur les documents satellitaires : observations hydrologiques, hydrogéologiques, des formations superficielles et autres observations telles que pédologie, géomorphologie, couvert végétal.

La recherche d'eau souterraine intervient sur des zones circonscrites dans le cadre d'opérations d'hydraulique urbaine, villageoise, agricole ou pastorale. La recherche de sites de forage par exemple en zone faillée repose essentiellement sur une analyse géostructurale complétée par des observations sur la nature des matériaux et sur la géomorphologie. L'étude des linéaments sur image satellite pourra être complétée par l'interprétation stéréoscopique des photographies aériennes.

L'étendue des zones à étudier détermine le type de document à utiliser : haute ou moyenne résolution. L'étude des structures géologiques et des formations géologiques sont menées en utilisant les différents canaux appropriés.

Les exemples d'applications en Afrique, réalisées par le Centre de Télédétection de Ouagadougou (CRTO) et d'autres institutions sont nombreuses. Les titres de différentes études sont suffisamment évocateurs des possibilités offertes par la télédétection :

- reconnaissance géostructurale du bassin sénégalais
- recherche hydrogéologique en Mauritanie pour l'établissement de cartes de reconnaissance préalable à la recherche d'eau souterraine.
- étude hydrogéologique régionale au Niger pour la détermination des capacités de stockage dans les dunes et des aquifères profonds.
- carte hydromorphologique régionale au Mali
- carte de synthèse des potentialités en relation avec les ressources en eau souterraines au Burkina Faso avec établissement d'une carte à 1/1.000.000.

Les développements récents de la télédétection permettent d'envisager une utilisation croissante de cette technique pour l'évaluation des ressources hydrogéologiques et la recherche des sites d'implantation des ouvrages de captage. Ces progrès concernent aussi les performances des nouveaux satellites que la disponibilité des données ou les moyens de traitement.

1.9. Interprétation des images satellites SPOT et cartographie des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols sur bassins sahéliens.

L'interprétation visuelle des images du satellite SPOT à haute résolution apporte une possibilité de cartographier les zones hydrologiquement homogènes sur un petit bassin versant. Chacune des zones étant caractérisée par une relation hydrodynamique, établie à l'aide d'un minisimulateur de pluie, il est alors possible de calculer des lames de ruissellement sur le bassin sous des pluies caractéristiques (fréquence décennale).

La mise au point de la méthode (recherche ORSTOM) nécessite un important travail de reconnaissance au sol pour relier les zones homogènes sur les images satellitaires à des caractéristiques d'état de surface. Avec la publication prochaine d'un recueil des états de surface en Afrique de l'Ouest, les projeteurs auront à leur disposition un outil leur permettant d'améliorer l'appréciation des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols des bassins, et par là améliorer la détermination des rapports et des débits de crue.

Les premiers résultats obtenus par l'ORSTOM sur les bassins alimentant la mare d'Oursi au nord du Burkina Faso démontrent l'intérêt de la méthode basée sur l'utilisation des produits performants de la télédétection.

1.10. Reconnaissance de la pluviométrie en zone intertropicale à l'aide de la télédétection.

Jusqu'à récemment les pluies sahéliennes étaient connues par les seules mesures au sol recueillies sur les réseaux. Aujourd'hui elles sont analysables du point de vue spatiale et temporelle à l'aide de la télédétection.

A l'échelle régionale et saisonnière, l'estimation de la hauteur de pluie en utilisant les données satellitaires METEOSAT est depuis 1985 assez concordante avec les données au sol. La relation entre occurrence de nuages à sommet froid sur un pixel (4 x 4 Km) et la hauteur de pluie mesurée est assez satisfaisante. En revanche à des échelles plus fines de temps et d'espaces, la méthode perd de sa précision.

L'exploitation des nombreuses données (48 images/jour) devrait néanmoins conduire à des résultats. Une expérimentation à mésoéchelle autour de Ouagadougou (100 x 100 km) a permis en 1986, à partir d'une centaine de postes pluviométriques et des données infrarouges de METEOSAT II, de prouver que la température du sommet des cumulo-nimbus permettait de cartographier les zones pluviogènes, mais ne permettait pas de fournir les hauteurs de la lame d'eau précipitée.



Cette lame d'eau, à l'échelle de l'averse, a une très grande variabilité spatiale. Cette variabilité est à mettre en relation avec la dynamique de déplacement de la perturbation anisotropique qui peut être décrite en terme de géométrie fractale. Certains paramètres au sol peuvent aussi influencer cette répartition des pluies.

## 2. Synthèse et propositions

### 2.1. Cartographie hydrogéologique

Dans le domaine de la cartographie hydrogéologique, l'attention et les efforts des pays de la sous-région devraient se concentrer, à ce moment de la poursuite des programmes déjà initiés, sur un certain nombre d'actions dégagées avec un large consensus.

Le CIEH apparaît comme l'organisme régional approprié pour mener à bien, en étroite collaboration avec ses Etats membres et les autres Etats de la sous-région, des travaux de concertation et de réflexion conduisant à des propositions concrètes sur les thèmes et actions suivants :

#### 2.1.1. Méthodologie

- a) - identification des utilisateurs des cartes : techniciens et scientifiques, responsables décideurs à des échelons administratifs divers (national, départemental), institutions de financement.
- b) - identification des thèmes à cartographier en retenant la superposition des paramètres strictement nécessaires à la poursuite des objectifs et à la compréhension des utilisateurs cibles.
- c) - coopération avec les institutions cartographiques nationales et régionales pour le choix des échelles et l'établissement des fonds de cartes, notamment topographiques et géologiques, qui servent de support à l'information thématique.
- d) - constitution de bases nationales de données informatisées de points d'eau directement exploitables dans les opérations de cartographie par un choix judicieux des constituants :
  - paramètres physiques et socio-économiques, à entrer dans les fichiers, en respectant des normes garantissant une certaine homogénéité régionale.
  - niveaux de saisie, de traitement et d'archivage (échelon provincial, national, régional).

- logiciels d'élaboration de fichiers dans la gamme des produits existants ou à créer.
- matériels de saisie et de traitement aux différents niveaux.
- e) - promotion des techniques de cartographie assistée par ordinateur qui permettent l'établissement de cartes thématiques évolutives à usage des opérateurs, aménageurs, planificateurs au niveau local, national et régional.

### 2.1.2. Collecte des données

- a) - dotation ou augmentation, et garantie des moyens humains, matériels et financiers des services nationaux hydrométéorologiques responsables de la collecte, de l'archivage et de la diffusion des données, en particulier formation des personnels dans les diverses disciplines où les besoins sont aigus telles que la géophysique, la qualité des eaux et la documentation.
- b) - amélioration de la collecte de l'information provenant des programmes d'hydraulique villageoise par la sensibilisation des opérateurs d'origines diverses et l'adoption de mesures réglementaires.
- c) - création ou renforcement des structures nationales d'archivage réglementé de la documentation sur les ressources en eau.

### 2.1.3. Coordination

- . constitution d'un groupe de travail des institutions impliquées dans la cartographie hydrogéologique à l'échelle du continent pour veiller à l'harmonisation des programmes.

### 2.2. Téledétection

La téledétection est un outil contribuant à réaliser l'inventaire des milieux physiques et humains, et d'en suivre l'évolution.

Ses récents développements permettent d'envisager son utilisation croissante pour :

- l'évaluation des ressources hydrogéologiques et la recherche des sites d'implantation des ouvrages de captage, l'interprétation visuelle et les traitements numériques des images fournissant à des échelles variées, des documents d'aide à la cartographie.

.../...

- la connaissance de la répartition spatiale et temporelle de la pluviométrie et du ruissellement en zone tropicale pour une meilleure valorisation des ressources pluviométriques dans le domaine agro-sylvo-pastoral et la gestion des ressources en eau de surface, en particulier grâce à une amélioration de la connaissance des écoulements et par là du dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Le CIEH doit porter un intérêt soutenu à la poursuite des études en cours et aux applications pratiques qui en sont issues. Il étudiera avec les organismes compétents les approches et les moyens à mettre en oeuvre en vue d'une utilisation adaptée de la télédétection pour l'établissement des bases de données et la cartographie des ressources en eau.

III. C O M M U N I C A T I O N S

COMMUNICATION 1

TITRE : EXPOSE INTRODUCTIF SUR LA  
CARTOGRAPHIE ET LA TELEDETECTION

AUTEUR : J.P. VINTER  
HYDROGEOLOGUE AU C.I.E.H.

La restitution cartographique de l'environnement, qu'elle soit descriptive ou de synthèse, a toujours constitué une base de décision pour les techniciens, les projeteurs et les planificateurs.

Le C.I.E.H. s'est voulu le promoteur de ces outils indispensables en assurant, sur financement du Fonds d'Aide et de Coopération du gouvernement français (FAC) et, en confiant la réalisation au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), la couverture du territoire de ses états membres avec des cartes de planification des ressources en eau, à une échelle de 1 ou 1,5 millionième.

- la zone Soudano-Sahélienne (1976)
- les pays côtiers (1979)
- l'Afrique Centrale (1979, 1082 et 1987)

Ces cartes ont toutes été élaborées avec le souci d'en faire des documents les plus complets possibles, assurant :

- la nature litho-stratigraphique des aquifères,
- des données hydrologiques et hydro-météorologiques,
- les ressources en eau renouvelables et/ou les réserves exploitables,
- selon les aquifères, les données piézométriques,
- les ouvrages de référence,
- selon les données disponibles, des cartouches sur d'autres informations.

Aux techniques traditionnelles, se sont ajoutées trois révolutions technologiques qui sont en constante évolution et vont en se développant :

- la généralisation, la montée en puissance et la baisse de prix des micro-ordinateurs qui autorisent localement la réalisation de calculs complexes et la constitution de bases de données importantes, autrefois apanage des gros centres informatiques, coûteux et centralisés ;
- l'apparition et la vulgarisation sur micro-ordinateurs de véritables systèmes de base de données infographiques (GIS) permettant des restitutions sur imprimante et table traçante de données ponctuelles, linéaires et zonales ;
- l'arrivée à un stade opérationnel et riche en possibilités de la télé-détection spatiale qui permet d'ajouter une dimension temporelle à la saisie de l'information et autorise par des traitements appropriés des images des cartographies sélectives.

.../...

Le C.I.E.H. a reçu pour mission, dans ces domaines également, de promouvoir et de contribuer au développement de ces nouvelles techniques.

- En collaboration avec le Centre Régional de Télédétection de Ouagadougou (CRTO), il a récemment publié et diffusé auprès de ses correspondants un ouvrage sur "les possibilités d'utilisation de la télédétection dans le domaine de l'eau en Afrique" (1986) ;
- En groupement avec le département eau du BRGM et le bureau d'études Géohydraulique, sur financement de la Coopération Economique Européenne (C.E.E.), il a participé à l'élaboration de la "carte de potentialité des ressources en eau souterraine de l'Afrique occidentale et centrale" (23 Etats dont les Etats membres du CIEH, au 1/5.000.000), carte évolutive intégrant les données des forages de nombreux programmes d'hydraulique villageoise, ayant abouti à la mise au point d'une nouvelle méthodologie.

L'utilisation de ces nouvelles techniques et les nombreuses possibilités qu'elles permettent, présentées par leurs auteurs et personnes ayant participé à ces projets, vont faire l'objet de deux thèmes importants de cet atelier.

Des spécialistes de ces questions présenteront d'autres réalisations et études relevant des mêmes thèmes :

- Application de la télédétection à l'étude de la pluviométrie et du ruissellement, respectivement par le centre informatique de l'Ecole des Mines de Paris et par l'ORSTOM ;

Utilisation d'un système géographique informatisé dans le cadre de l'étude du bilan d'eau, réalisé au BURKINA FASO pour l'établissement d'un plan directeur du secteur eau et son application à la cartographie de la province du Yatenga, par le bureau d'études IWACO.

Le C.I.E.H. a également offert son soutien technique et participé à la plupart des réunions et ateliers visant à la définition et au contenu du Programme de la Carte Hydrogéologique Internationale de l'Afrique (PCHIA), confié par l'OUA à l'Association Africaine de Cartographie (A.A.C.). Ce programme qui vise entre autres tâches au renforcement des structures nationales existantes vient de publier l'épreuve d'essai de la feuille Afrique de l'Ouest au 1/5.000.000 dont la présentation fera l'objet du premier thème de l'atelier.

Cette carte, de conception classique est destinée aux techniciens de terrain. Elle offre une synthèse des connaissances acquises en hydrogéologie et ne fait aucunement double emploi avec ses cartes de planification réalisées par le CIEH.

Le dernier thème sera l'occasion de la présentation, par ses responsables de la structure d'un organisme national dynamique, l'Institut Géographique du Burkina (IGB) qui nous fera connaître l'étendue actuelle de ses moyens et de ses possibilités, des exemples de ses réalisations et ses perspectives d'avenir.

Au cours de cette dernière journée, des communications diverses seront présentées comme celle relative à la formation dans le domaine de la géophysique qui, comme la cartographie, apparaît être un moyen indispensable d'accéder à une meilleure connaissance de la ressource pour assurer un meilleur développement.



COMMUNICATION /) /° 2

TITRE : CARTOGRAPHIE A MOYENNE ECHELLE  
PRESENTATION GENERALE DES CARTES  
AUX ECHELLES MOYENNES (1/1.000.000  
ET 1/500.000) TRAITANT DES RESSOURCES  
EN EAU EN AFRIQUE

AUTEUR : SAFAR ZITOUN  
EXPERT AUPRES DE L'AAC

SIGLES

- A.A.C. : ASSOCIATION AFRICAINE DE CARTOGRAPHIE
- AIH : ASSOCIATION INTERNATIONALE DES HYDROGEOLOGUES
- AISH : ASSOCIATION INTERNATIONALE DES SCIENCES HYDROLOGIQUES
- BRGM : BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES (FRANCE)
- CIEH : **COMITE** INTERAFRICAIN DES ETUDES HYDRAULIQUES  
(OUAGADOUGOU)
- PCHIA : PROGRAMME DE CARTOGRAPHIE HYDROGEOLOGIQUE INTERNATIONALE  
DE L'AFRIQUE
- UNESCO : UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC AND CULTURAL  
ORGANIZATION.

## I. INTRODUCTION

La consultation des catalogues des cartes réalisées sur le continent africain montre que de nombreux travaux de cartographie hydrogéologique y ont été réalisés aux échelles moyennes (1/1 million, 1/2 million, 1/1.5 million, 1/500.000 ...) aussi bien national que régional.

1. Les cartes nationales concernent 16 pays soit 30 % des pays membres de l'OUA et couvrent près du quart de la superficie totale du continent. Elle existent dans toutes les régions africaines (voir annexe 1).

2. Les cartes régionales par contre couvrent essentiellement les pays au Nord de l'Equateur (Maghreb - Sahel - Golfe de Guinée - Afrique Orientale). La plupart des cartes ont été réalisées à partir des années 60, donc après l'accession des pays africains à l'indépendance. De manière générale, et à quelques exceptions près, toutes sont l'oeuvre d'organismes ou d'auteurs et de financement non africains.

Enfin, si certaines cartes répondent à des normes à une conception internationale mise au point pendant de longues années donc "classiques", d'autres sont des travaux originaux qui ont le mérite d'introduire de nouvelles conceptions et de nouvelles techniques de réalisation tel que les systèmes de stockage de cartes et de cartographie assistée par ordinateurs avec ou sans l'apport de la télédétection.

Reste à se poser la question si ces techniques sont transposables en Afrique et quel serait le degré de dépendance des services et scientifiques africains vis à vis des organismes qui maîtrisent ces techniques ? la question est posée et le débat est ouvert !

## II. CLASSIFICATION DES CARTES HYDROGEOLOGIQUES AFRICAINES

Toutes les cartes réalisées sur le continent ont visé plusieurs objectifs qui influent en conséquence sur leurs structures et leurs contenus. Nous pouvons toutefois, avec Monsieur Margat (1), distinguer deux orientations dominantes :

\* une orientation scientifique, celle de carte hydrogéologique au sens strict. C'est ce courant qui a subi le principal effort de normalisation et de standardisation de la part de la communauté scientifique internationale et qui a abouti en 1970 à la "légende internationale des cartes hydrogéologiques" élaborée par l'UNESCO avec le concours de l'AIH et de l'AISH.

\* une orientation pratique visant à fournir des "informations élaborées directement utiles, comme éléments d'évaluation et de décision".

Ces deux orientations sont complémentaires. La seconde bénéficiant généralement des travaux de la première. Au vu de cela, nous pouvons donc distinguer deux types de cartes (2).

1. Les cartes hydrogéologiques "régulières" (qui répondent à la première orientation constituent des sortes de "banques de données visuelles" sur les ressources en eau souterraine ainsi que sur certains paramètres complémentaires : tel que hydrographie, morphologie, hydrologie de surface, infrastructures hydrauliques... Leur lecture est souvent difficile pour les non spécialistes.
2. Les cartes hydrogéologiques spécialisées ou "cartes des ressources en eau souterraine" (3) qui répondent à la seconde orientation peuvent être aussi variées que le sont les objectifs (planification, gestion des ressources en eau, aménagement du territoire, environnement, agriculture...) ou les utilisateurs (écoliers, décideurs, gestionnaire...).

Cette catégorie peut elle-même être subdivisée en deux familles (3).

a. Les cartes paramétriques qui s'adressent aux professionnels en hydrogéologie. Ce sont des cartes représentant l'évolution dans l'espace et parfois dans le temps d'un (single parameter map) (4) ou de plusieurs paramètres pouvant influencer sur les eaux souterraines (ou de surface).

Ce sont des cartes qui peuvent être dressées avant la carte hydrogéologique régulière. Cette dernière étant le résultat de leur compilation. Elles peuvent aussi être le résultat d'un travail plus élaboré qu'une carte régulière mais d'une lecture plus facile.

On peut citer par exemple les paramètres climatiques (pluies, pluies efficaces, températures, évapotranspiration, coefficient d'aridité...), les paramètres hydrodynamiques (piézométrie, zone d'artésianismes, perméabilité, productivité des ouvrages, systèmes aquifères) - paramètres chimiques (taux des nitrates, vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution)...

b. "Les cartes de message" qui ont pour but de communiquer l'aspect hydrogéologique aux "non-professionnels" chargés de planifier le développement futur d'une région ou de gérer les ressources en eau d'un territoire.

La catégorie des non professionnels peut être très large et inclure aussi bien les politiques (députés, gouverneurs...) que les planificateurs, les économistes, les agronomes, les géographes, les écologistes...

Des cartes des deux types existent en Afrique. Parmi les cartes hydrogéologiques régulières, nous pouvons citer "la carte hydrogéologique du Sénégal à 1/500.000 (1965), la carte hydrogéologique du Tchad (1969), la carte hydrogéologique de Madagascar au 1/1 million" (minute présentée à Dakar 1983).

Parmi les cartes hydrogéologiques spécialisées, nous pouvons citer dans la catégorie des cartes paramétriques la carte hydrochimique du Sénégal au 1/1 million (1966), la carte hydrogéologique de reconnaissance du Botswana au 1/500.000 (1969), la carte des systèmes aquifères du Maroc au 1/1 million (1976).

Dans les catégories des cartes de "message", nous pouvons classer les cartes des ressources en eaux souterraines de la Tunisie à grande échelle (dès 1965), les cartes de planification pour l'exploitation des eaux souterraines de l'Afrique Sahélienne au 1/1.5 million (1975), les cartes de planification des ressources en eau des pays du Golfe de Guinée au 1/1 million (1978).

## A. LES CARTES HYDROGEOLOGIQUES RECU LIERES

### a. La carte hydrogéologique du Tchad

Cette carte, dressée par J.L SHNEIDER, a été publiée par le BRGM en 1969, c'est à dire peu de temps avant la publication de la légende internationale des cartes hydrogéologiques par l'UNESCO (1970), ce qui explique la non conformité avec cette dernière de certains symboles et couleurs. Mais les grandes divisions demeurent : géologie - hydrogéologie - lithologie - hydrologie de surface - hydrochimie.

Les terrains hydrogéologiques sont classés en fonction de :

- \* la lithostratigraphie (20 classes)
- \* la perméabilité (4 classes).

Pour chaque classe, sont définies les conditions hydrogéologiques propres.

L'hydrochimie est très détaillée, 8 classes en fonction du taux de salinité ont été définies.

En hydrologie de surface, à part l'information sur le réseau hydrographique, les cours d'eau sont classés en fonction de leur débit d'étiage (en m<sup>3</sup>/s) 10 classes sont ainsi individualisées.

En marge de la carte principale, sont dressées plusieurs cartouches : une carte de la profondeur de la surface piézométrique, une carte des faciès chimique des eaux, une carte hypsométrique et pluviométrique et enfin une carte des nappes d'eau souterraine.

### b. Remarques générales

Les cartes hydrogéologiques des autres pays (Sénégal, Madagascar, Maroc) pour la plupart ont un système de représentation semblable.

Certains tirent de la légende internationale UNESCO quelques symboles mais il n'existe pas encore, à notre connaissance (à l'échelle que nous traitons) de carte qui se conforme à la légende UNESCO, qui, rappelons le, est le résultat d'un travail soutenu de plus de 15 années.

Il est donc, à conseiller aux services qui souhaitent réaliser des cartes hydrogéologiques régulières de puiser dans la légende internationale les symboles des informations qu'ils désirent mettre sur leurs cartes (5).

## B. LES CARTES HYDROGEOLOGIQUES SPECIALISEES

### a. La carte des systèmes aquifères du Maroc (échelle 1/1 million 1976)

Cette carte qui privilégie les paramètres hydrodynamiques au détriment de la géologie peut être classée parmi les cartes paramétriques dans le cas où "un système aquifère est défini comme étant le résultat des actions combinées de plusieurs paramètres hydrodynamiques" (conditions aux limites, échanges inter-nappes et/ou nappes - eaux superficielles, fonctionnement interne des réservoirs...).

La carte peut être exploitée de deux manières différentes ce qui explique l'existence de deux légendes :

- \* la première légende est simplifiée à l'extrême et est destinée à des utilisateurs n'ayant aucune notion d'hydrogéologie qui pourront localiser sans peine les principales nappes d'eau.
- \* la deuxième légende, résultat d'études synthétiques approfondies et de nombreux modèles de simulation, permet aux hydrogéologues d'obtenir "une idée globale au stade actuel des connaissances" (6).

La légende présente trois parties :

- la première traite de la représentation des limites des systèmes aquifères qui pour beaucoup de cas, ont fait l'objet de simulations par modèles physiques ou mathématiques. Vingt (20) conditions aux limites différentes ont été définies. Y sont traitées de manière particulièrement détaillée, les relations eaux de surface-eaux souterraines.

- la deuxième partie concerne la classification hydrogéologique des systèmes aquifères. Cinq familles sont individualisées :

- i. Systèmes aquifères à nappe phréatique seulement (pas de nappe profonde).
- ii. Systèmes aquifères à nappe phréatique et nappe (s) superposée (s).
- iii. Systèmes aquifères sans nappe phréatique mais pouvant présenter une (ou des) nappe (s) profonde (s).
- iv. Systèmes aquifères de nappe alluviale
- v. Domaines sans systèmes aquifères.

- la troisième partie traite de la qualité chimique des eaux.

b. La carte hydrochimique des nappes phréatiques du Sénégal - Echelle 1/1 million 1966

Carte à signaler seulement. La chimie des eaux est représentée en fonction des faciès et de la concentration. D'autres informations y sont données tels que la répartition spatiale du résidu sec (R.S.) par des courbes d'isovaleurs, le PH et CO<sub>2</sub> libre...

c. Les cartes des ressources en eau de Tunisie

Ces cartes dont la réalisation a débuté en 1965 et dont l'échelle est de l'ordre de 1/200 000 sont intéressantes à présenter comme exemple de "cartes de message".

Ces cartes sont d'un intérêt pratique immédiat et s'adresse essentiellement aux "non initiés" à l'hydrogéologie c'est à dire aux décideurs, planificateurs, responsables de l'aménagement du territoire ou du développement agricole.

Les paramètres représentés sont la profondeur de la ressource (ce qui influe sur le choix de l'outil de forage et son équipement), l'importance relative de la ressource et sa qualité chimique (ce qui influe sur l'aménagement possible à réaliser) enfin le zoning des régions à prospecter.

d. Les cartes de reconnaissance hydrogéologiques du Botswana

Les cartes à l'échelle du 1/500.000 éditées dès 1979 par le Gouvernement du Botswana répondent aux mêmes objectifs que les cartes des ressources en eau de Tunisie. Les terrains aquifères sont classés en fonction de la lithologie et de la productivité des points d'eau (ce qui rend ce type de carte intermédiaire entre les cartes hydrogéologiques régulières et les cartes de message).

e. Les cartes de planification des ressources en eau des pays du Golfe de Guinée

Ces cartes réalisées à l'échelle du 1/1 million et publiées dès 1978 par le BRGM pour le compte du CIEH sont le résultat de la superposition de plusieurs cartes de base :

la carte des pluies efficaces - la carte des faciès lithostratigraphiques - la carte hydrologique, ce qui a permis d'aboutir à une classification des cours d'eau en fonction des débits moyens à l'étiage, une classification des aquifères en fonction du type de milieu (continu, discontinu) et de l'importance des ressources renouvelables.

### III. CONCLUSION

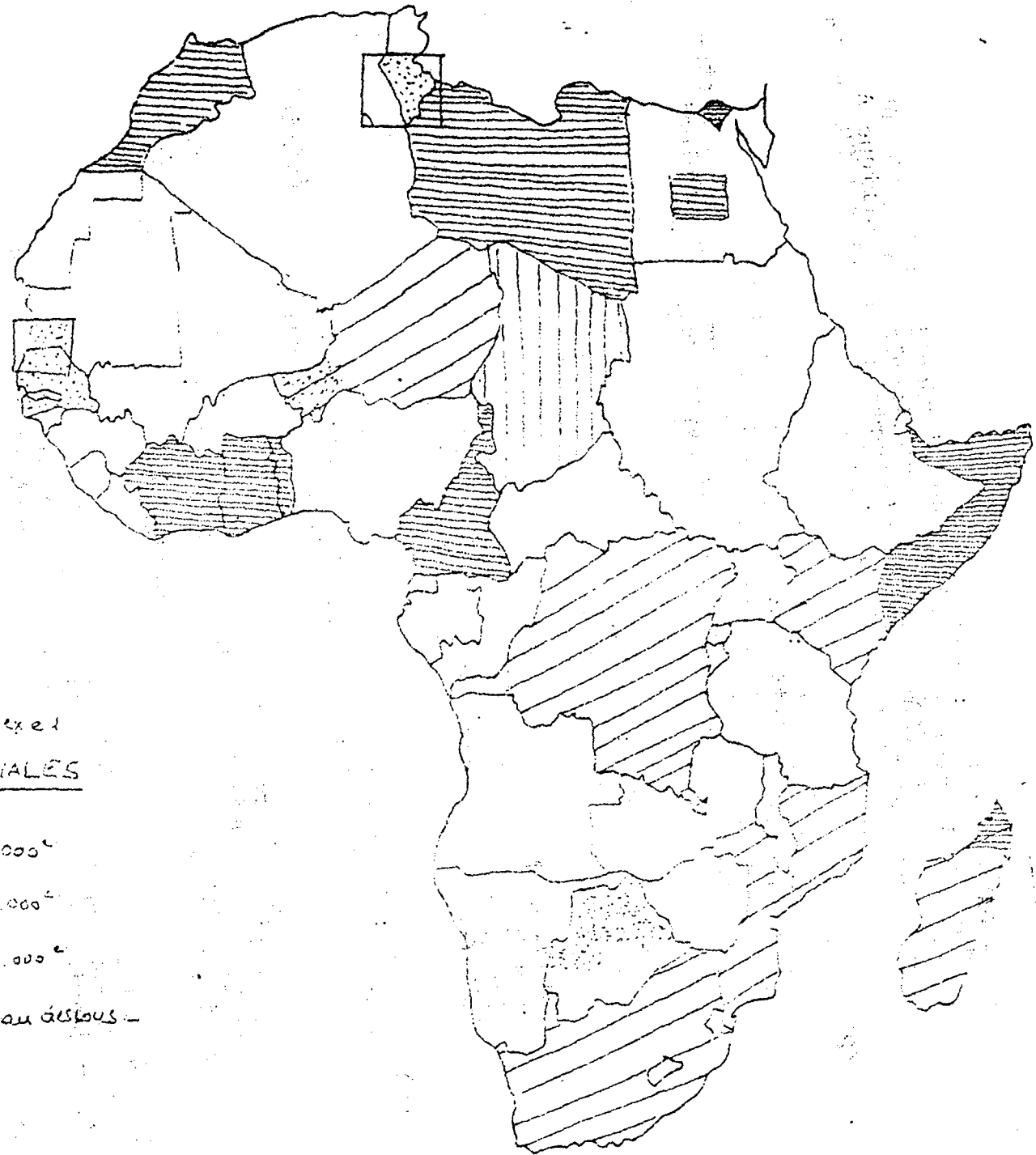
L'étude des exemples précédents qui ne sont qu'une petite partie de ce qui a été réalisé en Afrique en cartographie hydrogéologique, montre donc une grande gamme de cartes à des degrés de compréhension et de lecture différents. D'où la difficulté d'aborder le problème de la normalisation, les objectifs et les utilisateurs changent d'un pays à un autre et d'une époque à une autre.









BIBLIOGRAPHIE

- (1) J. MARGAT (1983) : réflexion sur l'objectif et le contenu d'une carte hydrogéologique internationale de l'Afrique à petite échelle (2ème réunion d'experts sur le projet OUA de la carte hydrogéologique de l'Afrique).
- (2) W. STRUCKMEIER (1986) : les cartes hydrogéologiques, leur contenu, classification et utilité. In rapport final de l'atelier régional pour la réalisation de la carte hydrogéologique internationale de l'Afrique - Lomé Avril 1986 (document de l'Association Africaine de cartographie p. 87 à 101).
- (3) J. MARGAT (1979) : la cartographie des ressources en eau souterraine (rapport interne du BRGM 79 SGN 783 HYD - 15 pages).
- (4) K.D.W. KRAMPE (1986) Data requirements for hydrogéological maps in rapport final de l'atelier régional pour la réalisation de la carte hydrogéologique de l'Afrique - Lomé Avril 1986 (document AAC p. 63 à 86).
- (5) UNESCO : international legend for hydrogéological map (édition 1970 et version révisée 1983) éditions de l'UNESCO.
- (6) DINIA (1976) introduction à la notice explicative de la carte des systèmes aquifères du Maroc au 1/1 million éditée en 1976 par la Division des ressources en eau, Direction de l'hydrologie, Ministère des travaux publics du Royaume du Maroc.
- (7) J.J. COLLIN (1986) Stratégie du développement du recours aux eaux souterraines pour l'irrigation en Afrique sub-saharienne - janvier 1986 - note technique du BRGM n° 86/1.
- (8) x cartographie assistée par ordinateur de potentialités en eau souterraine de l'Afrique de l'Ouest et centrale à 1/5 million (document présenté par J. MARGAT à l'atelier de Lomé sur le PCHIA Avril 1986).



AAC/PCHIA - Doc. 5/Annex 2.1

CARTES NATIONALES

-  échelles 1/500.000<sup>e</sup>
-  échelles 1/1.000.000<sup>e</sup>
-  échelles 1/1.500.000<sup>e</sup>
-  échelles 1/2.500.000<sup>e</sup> ou dessous



COMMUNICATION 3

**TITRE** : PRESENTATION DE LA FEUILLE DE L'AFRIQUE  
DU NORD OUEST DE LA CARTE HYDROGEOLOGIQUE  
INTERNATIONALE DE L'AFRIQUE; RESULTATS ET  
ANALYSE

**AUTEUR** : SAFAR ZITOUN  
HYDROGEOLOGUE, COORDONNATEUR SCIENTIFIQUE  
DU PROGRAMME DE CARTOGRAPHIE HYDROGEOLOGIQUE  
INTERNATIONAL DE L'AFRIQUE AUPRES DE L'ASSOCIATION  
AFRICAINNE DE CARTOGRAPHIE.

## RESUME

Un des axes de travail du programme de l'Organisation de l'Unité Africaine de cartographie hydrogéologique internationale de l'Afrique "PCHIA" consiste en la réalisation d'une "carte hydrogéologique internationale de l'Afrique" en 5 feuilles à l'échelle du 1/5 million.

La note présente concerne les premiers résultats de la première feuille qui intéresse entièrement ou partiellement 16 pays de l'Afrique du Nord-Ouest et qui a été présentée du 12 au 14 novembre à une réunion d'experts réunis par l'OUA en son siège.

Après un rapide rappel des conditions géologiques, climatiques et hydrologiques, l'auteur présente un zoning hydrogéologique qui permet de définir cinq ensembles hydrogéologiques homogènes sur la base de critères structuraux, lithologiques et "d'alimentation" :

- \* l'ensemble atlasique
- \* l'ensemble des bassins côtiers atlantiques
- \* l'ensemble des bassins intérieurs
- \* l'ensemble du socle
- \* l'ensemble des îles volcaniques atlantiques.

Une subdivision supplémentaire peut s'y ajouter si l'on tient compte de la zonation climatique.

Chaque ensemble (ou sous ensemble) dispose donc d'une "hydrogéologie propre" ce qui rend les moyens d'étude, de prospection, d'analyse et de synthèse sensiblement différents d'une région à une autre en particulier l'approche cartographique à échelle moyenne.

## ABSTRACT

The main work of the Organization of African Unity hydrogeological mapping programme is the carrying out of "the international hydrogeological map of Africa" in five (5) sheets at the scale 1/5 million.

The present note concern the first results of the 16 north West African countries' sheet.

After a rapid recall of the geological, climatic and hydrological conditions, the author present a hydrogeological zoning defining five (5) homogeneous hydrogeological areas on structural, lithological and feeding criterious bases :

- . atlasic area
- . atlantic coustal basins area
- . internal basins area
- . basement area
- . atlantic islands area.

Every area had its proper hydrogeology which make the study, prospecting, analysis and synthesis means very different between the areas particularly the mean scale cartographic approach.

## 1. APERCU GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

Géographiquement, la région cartée correspond au 1/5 de la superficie du continent soit 5 millions de km<sup>2</sup>.

Sa limite Est suit approximativement le Méridien de Greenwich et part de la frontière Maroc-Algérienne, longe le Tanezrouft, les adrar des Iforas passe près de la ville de Gao au Mali pour aboutir entre Lomé et Cotonou (capitales respectives du Togo et du Bénin) sur l'océan atlantique.

Topographiquement, les seuls points hauts sont les massifs de l'Atlas (Moyen haut et anti-Atlas) au Maroc (Toubkel 4165 m) et les monts du Fouta Djallon (1538 m) en Guinée prolongés parallèlement à la côte par la dorsale guinéenne jusqu'en Côte d'Ivoire.

Le Fouta Djallon et la chaîne **atlassique** sont les deux châteaux d'eau d'où prennent naissance la plupart des rivières et fleuves de la région. En particulier, le Niger, le Sénégal, la Gambie et les fleuves côtiers du Golfe de Guinée pour le Fouta Djallon, l'Oum Erbita, la Moulouya et le Drâa pour le Haut Atlas.

Géologiquement, nous pouvons distinguer deux époques de formation des terrains de la région.

1. La période **anté-hercynienne** à laquelle appartiennent les plate-formes anciennes composée du bouclier Reguibat au Nord et du bouclier Libero éburnéen au Sud.

Les deux boucliers sont reliés entre eux par une chaîne rajeunie : les Mauritanides.

Les lithologies caractéristiques de ces formations sont :

- les granito-gneiss et migmatites (précambien C2 et D) ;
- les schistes gréseux et quartzitiques (birrimien).

2. Pour la période post-hercynienne, nous pouvons distinguer :

- la marge alpine contenant les formations marocaines au Nord de la flexure Sud Atlasique.

- la marge atlantique depuis le Maroc jusqu'au Golfe de Guinée avec les bassins côtiers d'El Aoun, Sénégal-Mauritano-Guinéen, d'Abidjan et Bénino-Togolais (prolongement ouest du Delta du Niger).

A cette famille, nous pouvons inclure tectoniquement les archipels des Canaries et du Cap Vert.

- le domaine intraplaque continental comprenant de grands ensembles géomorphologiques tels que :

. les bassins intérieurs de Tindouf et de Taoudeniâ

. la dorsale de l'Ougarta.

a. Dans la marge alpine (dite active), se retrouvent plusieurs domaines :

. le domaine Riffo-Tellien caractérisé par la présence de nappes de charriage souvent de plusieurs dizaines de kilomètres. La lithologie des terrains est à prédominance de flyschs.

. le domaine préatlasique des Mesetas - marocains aux hautes plaines oranaises caractérisé par des séries carbonatées très rigides et une tectonique cassante.

. le domaine atlasique qui comporte le Haut Atlas et le Moyen Atlas marocain est fortement plissé et essentiellement carbonaté.

A l'intérieur de ces domaines plusieurs bassins côtiers ou intérieurs existent et leur histoire géologique est fortement influencée par celle de la marge active.

b. La marge atlantique (marge dite passive) contient tous les bassins côtiers atlantiques qui sont du Nord au Sud. Le bassin d'El Aoun, le bassin de Mauritanie - Sénégal - Guinée, le bassin d'Abidjan, la partie Ouest du Delta du fleuve Niger (bassin bénino togolais).

Les bassins d'El Aoun, Sénégal - Mauritanien et de Guinée sont formés par de puissantes couches subhorizontales du secondaire et du tertiaire (avec plusieurs discordances).

S'y individualisent les Horsts de Dakar et de N'diass. Les lithologies dominantes restent les grès et conglomérats du continental intercalaire terminal et Maestrichien (Sénégal) avec parfois des formations marno-calcaires d'âge éocène et pliocène (Sénégal).

Quant aux archipels des Canaries Madère et du Cap Vert, ils sont constitués par du matériel volcanique néogène et quaternaire. Ils présentent parfois dans leur partie orientale des formations sédimentaires épaisses similaires à ceux des bassins côtiers Ouest-Africains.

c. Dans le domaine continental se distinguent les domaines suivants :

. le bassin de Tindouf, synclinal d'axe approximatif Est-Ouest dont les flancs Nord et Sud sont formés par d'épaisses couches paléozoïques et le coeur par des couches mésozoïques et cénozoïques reposant en discordance sur les précédentes. Les lithologies sont variées.

. le bassin de Taoudeni occupe toute la partie centrale de la zone d'étude. Bien que de structure complexe, il a une histoire comparable à celle du Bassin de Tindouf. Ce bassin très vaste a cependant des couches sédimentaires anciennes épaisses occupant une superficie importante dans ses parties maliennes et mauritaniennes (Tagant - Hodh - Gourma - Bandiagara au Sud et Khnechich en bordure du Tanezrouft Algéro - Malien au Nord).

\* Les dorsales des anti-Atlas et des monts de l'Ougarta formés de terrains plissés paléozoïques en auréole autour des "boutonniers" du protérozoïque supérieur et moyen. Les lithologies sont variées.

## II. LES CLIMATS

Sans détailler les phénomènes climatiques très différents d'une zone à une autre, nous pouvons distinguer schématiquement quatre zones climatiques (N. Petit Maire) qui sont du Nord au Sud :

1. Zone méditerranéenne
2. Zone saharienne
3. Zone sahélienne
4. Zone tropicale.

Ces zones ont migré dans le temps et on peut distinguer trois périodes :

- la période sèche de 18 000 à 12 000 ans P.c.
- la période humide de 9 500 à 4 500 ans P.c.
- la période actuelle.

Les précipitations annuelles moyennes varient du Nord au Sud de 1 000 mm dans l'Atlas marocain. 10 mm dans le Tanezrouft pour s'élever à 600 mm à Dakar et dépasser les 3 000 mm à Monrovia et Conakry. Les saisons ne sont pas les mêmes selon les zones climatiques. Au Maroc, la période des pluies va de septembre à avril avec deux points hauts en décembre et mars.

A Nouadhibou en zone présaharienne pour une moyenne annuelle de 48 mm, la période des pluies va de août à novembre. Enfin, à Conakry zone sujette aux moussons tropicales, la période des pluies s'étale de juillet à septembre avec une moyenne annuelle des précipitations de 4450 mm/an.

### III. HYDROGRAPHIE ET HYDROLOGIE DE SURFACE

Le réseau hydrographique de la région est tributaire des phénomènes climatiques propres à chaque zone climatique.

Il est aussi "contrôlé par la morphologie, la géologie des terrains et leur nature lithologique".

2. Les cours d'eau de la zone méditerranéenne drainent des bassins versants exoréiques dont la superficie varie de 1000 km<sup>2</sup> (oued Zaou) à 64 000 km<sup>2</sup> (Oued Moulouya). Les débits annuels moyens aux exutoires ne dépassent pas les 91 m<sup>3</sup>/s (Oued Sébou). Les crues commencent en octobre pour atteindre le maximum en février - mars (60 % de l'écoulement annuel moyen).

Les cours d'eau transportent des quantités importantes en matières solides qui provoquent les envasements rapides des barrages et autres retenues.

2. Les cours d'eau de la zone saharienne drainent des bassins versants endoréiques difficilement délimitables mis à part les cours d'eau du Sahara Occidental et du Nord Mauritanéen qui ont un exutoire sur l'Océan Atlantique.

Les crues qui interviennent de septembre à avril peuvent être brutales et charrier un débit important d'eau et de terre qui pourrait atteindre 90 % du débit annuel moyen.

3. Les cours d'eau de la zone sahélienne et de la région tropicale sont caractérisées par des débits importants :

- 1560 m<sup>3</sup>/s pour le Niger à Koulikoro (Mali)
- 771 m<sup>3</sup>/s pour le Sénégal à Bakel (Sénégal)
- 303 m<sup>3</sup>/s pour le Sassandra à Guessabo (Côte d'Ivoire)
- 1231 m<sup>3</sup>/s pour la Volta à Senchi (Ghana)

Les débits sont dus au fait que tous les fleuves de la région prennent naissance dans le Massif du Fouta Djallon en Guinée et sur la dorsale guinéenne qui se trouvent en zone climatique tropicale ce qui leur donne leurs caractères propres.



Les bassins versants drainés sont très importants et peuvent intéresser plusieurs Etats (ex : le Niger qui intéresse 9 Etats africains draine à Mopti au Mali, une superficie de 350 000 km<sup>2</sup>). De plus au passage de la zone climatique tropicale à la zone sahé-lienne puis à la zone saharienne, les fleuves Niger et Sénégal voient leurs débits diminuer parfois à plus de 50 % par l'action conjuguée de l'évaporation et de l'infiltration (vers les nappes alluviales des fleuves Sénégal et du Niger).

Cependant la sécheresse provoquée par un déficit pluviométrique de plus en plus marqué et qui persiste depuis 1967 - 1968 couplée à la déforestation a eu pour conséquence un déficit d'écoulement voire même un tarissement des fleuves et rivières. Ainsi, les étiages du fleuve Niger et Niamey ont atteint au mois de mai 1985 la valeur la plus basse jamais vue (de mémoire d'homme) soit 0 m<sup>3</sup>/s.

#### IV. ESSAI DE ZONAGE HYDROGEOLOGIQUE

Nous savons que pour qu'un "réservoir d'eau" puisse exister, il suffit qu'il remplisse favorablement deux des trois conditions suivantes :

- la condition de structure (S)
- la condition de lithologie (L)
- la condition d'alimentation (A)

Les deux premières conditions sont liées à la géotectonique, la troisième à la climatologie.

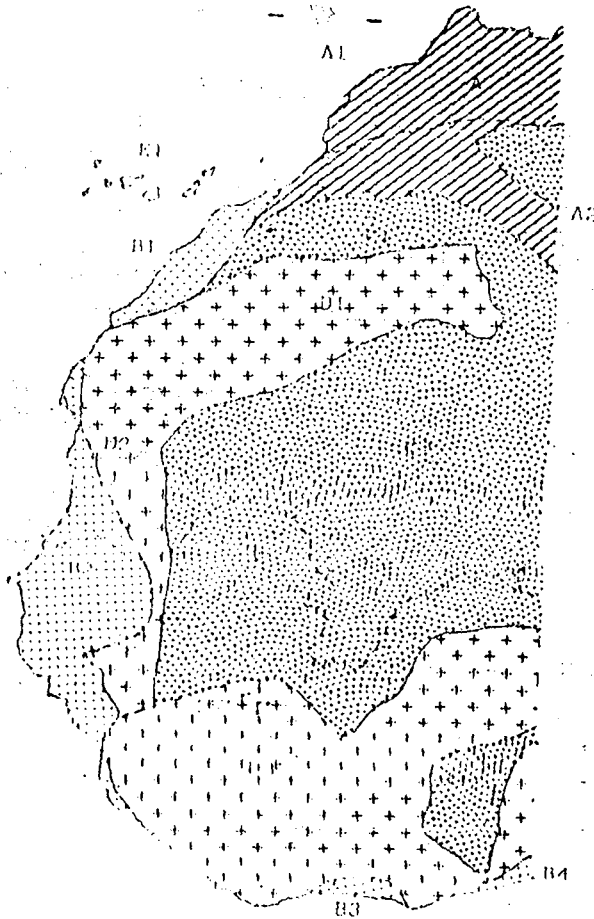
Au vu de ces critères, nous avons pu définir cinq grands ensembles hydrogéologiques (fig n° 1).

Chaque ensemble peut être subdivisé en régions puis en domaines, puis en systèmes et enfin en nappes aquifères.

Les cinq ensembles sont :

- ensemble atlasique
- ensemble des bassins côtiers
- ensemble des bassins intérieurs
- ensemble du socle
- ensemble des îles volcaniques atlantiques.

Fig. n° 1  
Principaux ensembles  
hydrogéologiques



LEGENDE

- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| Ensemble atlasique                            | A1 : région Nord Atlasique         |
|   | B2 : région Sud Atlasique          |
| Ensemble des bassins côtiers                  | B1 : bassin de Tarfaya - Ed Dakhla |
|   | B2 : bassin sénégalo mauritanéen   |
|   | B3 : bassin de Côte d'Ivoire       |
|   | B4 : bassin du Golfe de Guinée     |
| Ensemble des bassins intérieurs               | C1 : bassin de Tindouf             |
|   | C2 : bassin de Fouta               |
|   | C3 : bassin des Voltas             |
| Ensemble du socle                             | D1 : bassin du M'Ghribal           |
|   | D2 : Mauritanides                  |
|   | D3 : Dorsale du Mau                |
| Ensembles des îles volcaniques<br>Atlantiques | E1 : Les îles Canaries             |
|   | E2 : Les îles du Cap Vert          |

## A. ENSEMBLE ATLASIQUE

Cet ensemble du Nord de la feuille peut se subdiviser en deux régions Nord et Sud Atlasique.

A.1. La région Nord Atlasique se subdivise en plusieurs domaines qui forment une suite géomorphologique de zones plissées et de dépressions. Du Nord au Sud on peut distinguer :

1. Le domaine rifain composé dans son ensemble de flyshs considérés comme imperméables à part quelques secteurs à perméabilité de fissures et une chaîne calcaire fortement karstifiée qui longe la Méditerranée.
2. Le domaine des bassins péririfains composé de deux grands bassins l'un côtier (Rharb) et l'autre intérieur (Fès-Meknès) tous deux formés d'un remplissage plioquaternaire contenant plusieurs nappes superposées interdépendantes à drainage verticale descendante (premier bassin) ou ascendante (deuxième bassin).
3. Le domaine des Mesetas marocaines et du Moyen Atlas formé par les plateaux paléozoïques des Mesetas d'un faible intérêt hydrogéologique mis à part les dépressions plioquaternaires de Berrechid et de la Chaouia (près de Casablanca) et le moyen atlas composé de deux parties hydrogéologiquement distinctes : le Causse tabulaire fortement karstifié riche en eaux à l'Ouest et le Moyen Atlas plissé peu karstifié à l'Est de part et d'autre d'importants accidents tectoniques.
4. Le domaine des bassins intra-atlasiques plioquaternaires à plusieurs nappes superposées du Haouz (Marrakech), du Tadla et de la Moulouya.
5. Le domaine du Haut Atlas et des Mesetas algériennes formé par :
  - \* le Haut Atlas lui-même subdivisé en un haut atlas Occidental, paléozoïque et médiocre en potentialités aquifères, un haut Atlas calcaire aux ressources superficielles importantes et enfin le Haut Atlas Oriental calcaro-dolomitique, peu karstifié et hydrogéologiquement médiocre.
  - \* les Mésetas algériennes qui forment de vastes plateaux couverts par d'épaisses couches tertiaires stériles mais contenant en profondeur des nappes généralisées dans les formations calcaires du jurassique et du crétacé.
6. Le domaine des bassins subatlasiques qui longent la flexure sud atlasique. La plaine multicouches du Souss et le bassin de Ouarzazate.

A2. La région hydrogéologique sud Atlasique formée par :

. l'antiatlas caractérisé par des dépôts cambriens moyennement karstifiés traversés en boutonnières par des granito-gneiss pouvant contenir des nappes discontinues dans les zones fissurées et les couches d'altération.

. les monts de l'Ougarta formés de grès paléozoïques faiblement aquifères.

### B. ENSEMBLE DES BASSINS COTIERS

#### B1. Le bassin de Tarfaya - Ed Dakhla (El Aoun)

occupe une superficie de 90 000 km<sup>2</sup>. Il est assimilable à un système multicouches aquifères à plusieurs niveaux : crétacé inférieur et moyen paléocène et plioquaternaire.

#### B2. Le bassin sénégal-mauritano-guinéen

est un puissant système multicouches où se superposent plusieurs nappes. En Mauritanie sont aquifères le continental terminal et l'Eocène sableux avec une surface piézométrique "en creux" (ARCHAMBAULT 1987) plongeant vers le continent facilitant une intrusion saline qui pénètre profondément à l'intérieur du bassin.

Au Sénégal, les niveaux aquifères sont contenus dans les grès du Maestrichien et du continental terminal ainsi que dans les calcaires lutétiens et paléocènes qui affleurent en Guinée Bissau en une vaste aire d'alimentation.

#### B3. Le bassin d'Abidjan

est un système multicouches contenant des aquifères superposées (quaternaire, continental terminal et maestrichien) interdépendantes à drainage verticale descendante.

B4. Le bassin togolo-béninois de structure semblable aux précédents bassins.

### C. ENSEMBLE DES BASSINS INTERIEURS

C1. Le bassin de Tindouf est hydrogéologiquement peu intéressant sauf pour le carbonifère calcaire quelque peu karstifié au Sud.

C2. Le bassin de Taoudeni qui occupe toute la partie centrale de la feuille est malheureusement insuffisamment prospecté. Il présente des intérêts hydrogéologiques sur les flancs formés essentiellement du sédimentaire ancien, en particulier les unités gréseuses du Tagant et d'El Aoun (en Mauritanie) du plateau Mandingue et de Bandiagara (au Mali) contenant des aquifères discontinus fortement dépendant de la fracturation.

Le sédimentaire récent par contre (continental intercalaire et terminal) peut contenir des nappes à potentialités importantes (Tanézrouft algéro-Malien), fossé de Nara (Mauritanie), Delta intérieur du Niger (Mali).

C3. Le bassin paléozoïque des voltas a un comportement hydrogéologique semblable au sédimentaire ancien du bassin de Taoudéni et de l'ensemble du socle.

#### D. ENSEMBLE DU SOCLE

C'est le milieu fissuré par excellence qui fut fortement prospecté ces dix dernières années depuis l'apparition de la sécheresse et dans le cadre des programmes d'hydraulique villageoise. Il intéresse six pays de la région.

On peut y distinguer deux provinces hydrogéologiques distinctes correspondant aux deux familles lithologiques principales.

- la province à dominante granito-gneissique ou migmatitique, la plus étendue du point de vue géographique, est caractérisée par une épaisseur d'altération qui peut atteindre 30 m. L'eau peut être contenue en partie dans les altérites et surtout dans les réseaux de fractures sous jacents et les failles non colmatées.

Le pourcentage de succès est de l'ordre de 50 %. La productivité des forages est bonne et est de l'ordre de 10 m<sup>3</sup>/h.

- la province à dominante schisto-gréseuse (qui correspond aux limites du Birrimien schisteux) est caractérisée par des couches altérées en surface d'épaisseur variable.

Elle peut dépasser les 50 m au Sud et diminuer au Nord jusqu'à être nulle au Burkina Faso.

Dans ce cas, les eaux se rencontrent dans les horizons inférieurs des altérites au contact de la roche saine ainsi que dans les zones fissurées et faillées. Les forages d'hydrauliques villageoises donnent des forages de débits moyens (4 m<sup>3</sup>/h) par contre le pourcentage de succès est élevé (80 %).

En milieu cristallin, cristalophyllien et sédimentaire ancien, on peut distinguer en Afrique de l'ouest deux ou trois types de réservoirs aux caractéristiques physiques et hydrogéologiques différentes.

1. Le réservoir supérieur d'altérites qui comprend :

• Pour les granito-gneiss par exemple "trois horizons" ;

- la cuirasse latéritique
- les altérations argileuses
- les arènes grenues.

• pour les schistes il correspond à une couche épaisse à dominante argileuse.

• dans le sédimentaire ancien, ce réservoir est absent. L'épaisseur des altérites est en moyenne de 10 à 20 m dans les granites et de 40 m dans les schistes.

2. Le réservoir de fissures

C'est la zone située au dessus de la roche saine caractérisée par des réseaux denses de fissures et de diaclases. L'épaisseur peut aller jusqu'à 50 m dans le cristallin mais dépasse les 60 - 70 m dans le sédimentaire ancien.

3. Le réservoir de failles et de fractures majeures

C'est une zone préférentielle de circulation d'eau dans des bandes de quelques mètres à quelques centaines de mètres autour d'accidents profonds et subverticaux.

Les approches méthodologiques pour ce genre d'aquifères sont spécifiques de même d'ailleurs que les outils de forage utilisés.

E. ENSEMBLE DES ILES VOLCANIQUES ATLANTIQUES

1. L'archipel des Canaries-Madère est constitué par du matériel volcanique limité parfois par des formations sédimentaires calcaires ou sableuses fissurées et parfois karstifiées contenant des aquifères à transmissivité variable, généralement basse. Plusieurs zones d'arènes, d'alluvions et conglomérats contiennent des aquifères cotius à transmissivité moyenne à basse.

2. Les îles du Cap Vert sont formées d'une série sédimentaire en auréole autour du complexe volcanique central. L'hydrogéologie mal connue serait la même que celle des Iles Canaries.

## V. ETUDE HYDRODYNAMIQUE COMPARATIVE

Bien que les phénomènes climatiques diffèrent d'une zone climatique à une autre, nous pouvons en observant la répartition pluviométrique et mieux encore celle des précipitations efficaces (en marge de la carte) considérer que nous avons trois types de zones :

- les zones humides (zone tropicale et montagnes du Maroc) dans lesquelles sont inscrits :
  - . une partie de la région Nord Atlasique ;
  - . le Sud du bassin Sénégal-Mauritanien et son prolongement guinéen, les bassins côtiers de la Côte d'Ivoire et du Golfe du Bénin ;
  - . le bassin paléozoïque des Voltas ;
  - . la dorsale du Man.
- les zones semi-arides (zone méditerranéenne et zone sahélienne) dans lesquelles sont inscrits la totalité de la région Nord atlasique, la partie centrale du bassin Sénégal-Mauritanien, le Sud du bassin de Taoudéni.
- les zones arides qui occupent la partie centrale de la carte et s'étendent sur les bassins de Tarfaya-Ed Dekhla, le Nord du bassin Sénégal-Mauritanien, les bassins de Tindouf et de Taoudéni enfin de R'Guibat ainsi que les Iles atlantiques.

Ces zones influent directement sur l'hydrodynamique des aquifères et plus particulièrement sur les paramètres apports (flux entrants) et émissions (flux sortants).

1. De manière générale, les aquifères des zones humides, qu'ils soient continus ou discontinus, sont alimentés essentiellement par infiltration des eaux météoriques sur toute leur superficie (qui peut dépasser les 100 mm/an).

Les aquifères continus de type captif y sont le siège de drainance verticale (ascendante ou descendante).

Le régime des variations de niveau des eaux souterraines est annuel avec des recharges régulières qui se produisent une à deux fois par an. Nous donnons trois (3) exemples ci-après pris dans des ensembles hydrogéologiques différents (fig 2, 3 et 4).

Ce sont donc des aquifères qui ne posent théoriquement pas de gros problèmes de gestion du fait du renouvellement continu de leurs ressources.

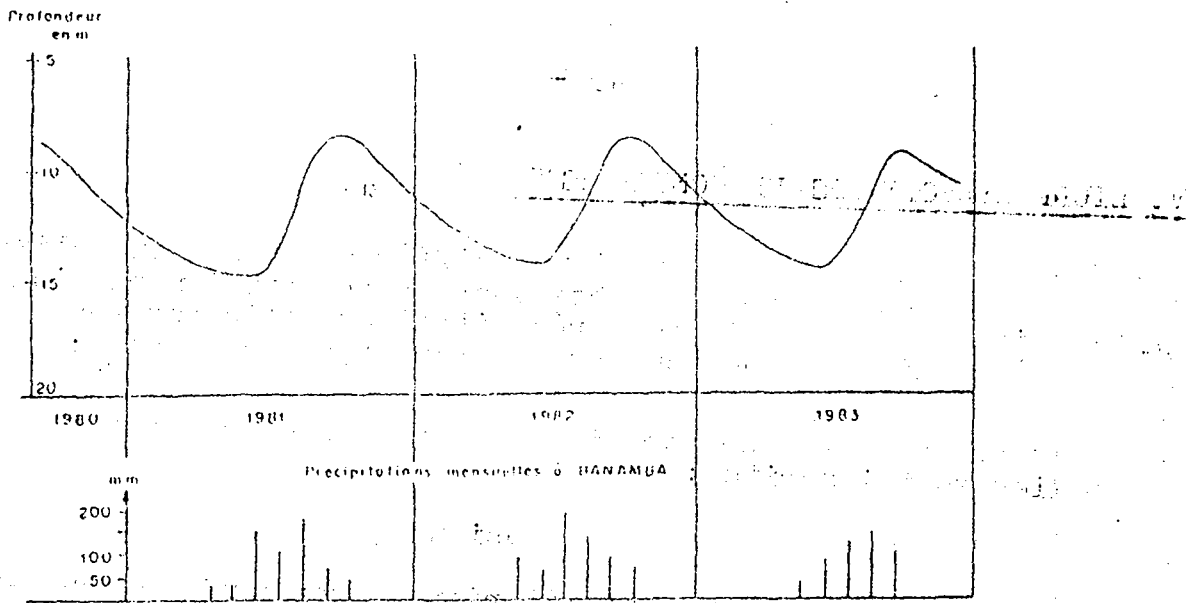


Fig. 2 - Variations de niveau d'une nappe libre à alimentation pluviale au Mali, région de Banamba - Kolokani (S de Bamako).  
Aquifère : altérites sur grès infra-Cambriens  
Réf. : projet PNUD/ALLI 82/005 - 1984

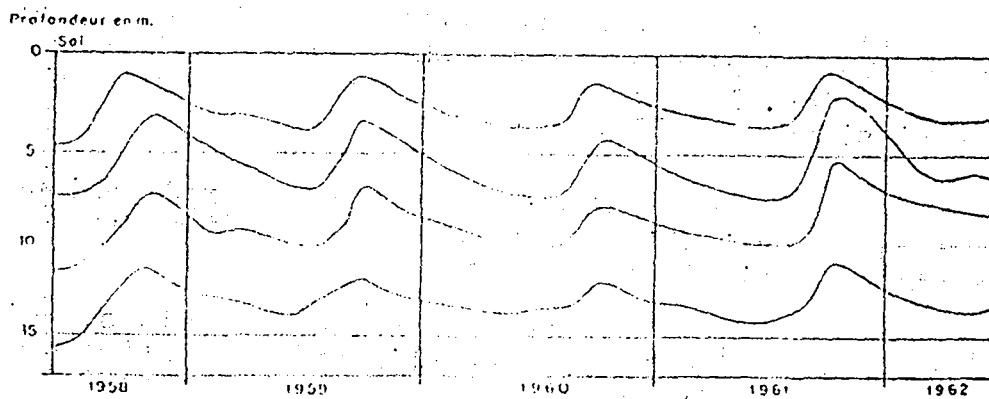


Fig. 3 - Variations de niveaux de nappes libres à alimentation pluviale au Sénégal, en Casamance.  
Aquifère : sables argileux du "Continental terminal".  
Ref : CIEM/BRGM 69 DAK 7 - 1969



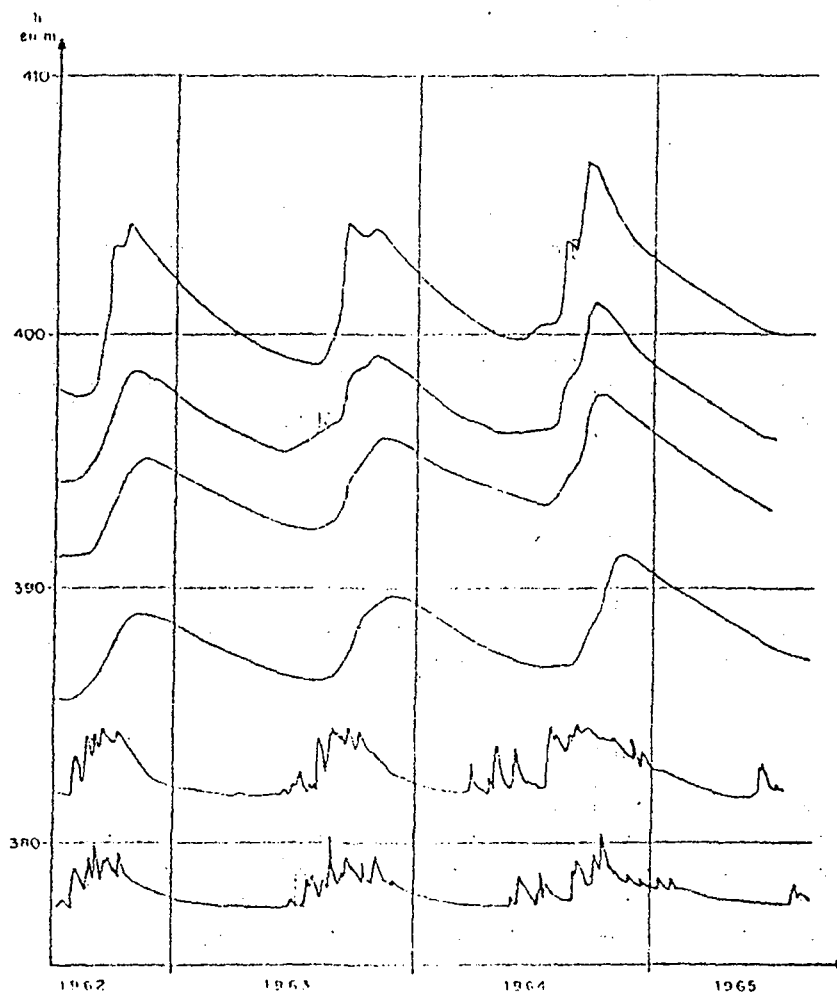


Fig. 4 - Variations de niveaux d'une nappe libre à alimentation pluviale en Côte d'Ivoire à Khorogo. Aquifère : altérée au socle cristallin.  
 RÉF. : CIEH/BRGM, 1964-1967 - R. DE GALLIER 1975.  
 De haut en bas : niveaux moins profonds et plus proches d'une limite à condition de potentiel (émergence) :

A l'opposé des précédents aquifères, ceux des zones arides ne sont pratiquement pas alimentés par les eaux météoriques (la valeur moyenne de l'infiltration varie de quelques dizaine de mm/an en bordure atlantique à zéro vers l'intérieur).

Le principal mode d'alimentation dans ces zones est l'infiltration à partir des eaux superficielles par ruissellements locaux limités dans le temps et dans l'espace, et qui permettent par exemple le renouvellement des nappes locales telles celles dites d'inféoflux dans le Sahara.

Cette alimentation ne représente pour les grands aquifères qu'une quantité relativement faible voire insignifiante comparée aux stocks importants en eau emmagasinée.

La gestion de ces systèmes ne peut donc être que de "type minier" la ressource étant épuisable à plus ou moins longue échéance et le régime des variations de niveaux de ces nappes est décroissant et pratiquement fonction de l'exploitation humaine. Dans les régions sujettes à un minimum de pluviométrie, le régime devient apériodique (cf fig. 5).

Les zones semi-arides sont une transition entre les deux types précédents. Les aquifères y possèdent une alimentation par les eaux météoriques et superficielles, c'est le domaine de régime des variations des niveaux piézométriques dit mixte. Toutefois, la pluviométrie, relativement faible et irrégulière, influe sur les paramètres infiltration et donne aux aquifères un régime dominant plutôt apériodique et pluriannuel (fig. 6).

L'alimentation à partir des eaux superficielles reste importante du fait que les cours d'eau alimentants sont issus des zones humides en particulier les fleuves Niger, Sénégal et Gambie.

## VI. INCIDENCE SUR LA CARTOGRAPHIE

Nous avons vu dans les précédents chapitres que les différents ensembles ont chacun une spécificité hydrogéologique particulière. Ce qui influe sur le type de paramètre à représenter dans les cartes hydrogéologiques (régulières ou spécialisées) aux échelles moyennes.

Il faut pour ainsi dire pour chaque ensemble une légende, donc un type de carte particulier. Ce qui n'est pas en contradiction avec une représentation normalisée (un même paramètre étant représenté par le même symbole ou la même couleur).

Dans le tableau ci-après nous tentons une comparaison entre les paramètres hydrogéologiques cartographiables des différents ensembles.

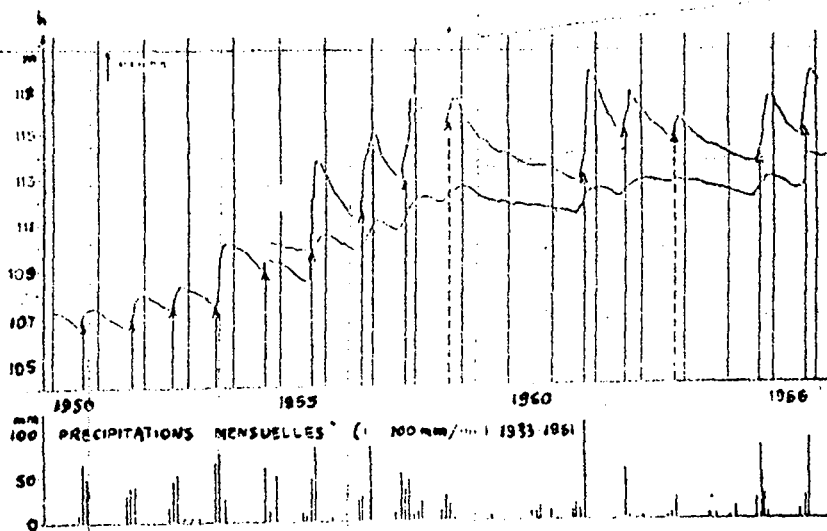


Fig. 5 - Variations de niveaux d'une nappe libre en zone semi-aride, alimentée par infiltration d'eau de surface (crues), en Mauritanie, à Akjoujt, de 1950 à 1966. Aquifère : altérites sur schistes et roches vertes. Réf. : BRGM DAK, 1961 - CIEH/BRGM 1969.

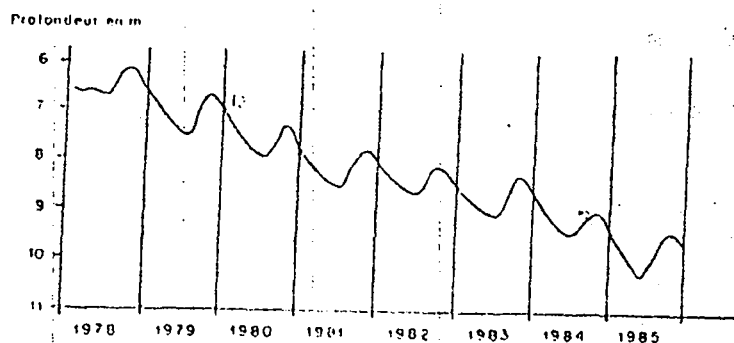


Fig. 6 - Variation de niveau d'une nappe libre à alimentation pluviale, au Burkina-Faso, à Ouagadougou. Régime mixte : variations annuelles superposées à une tendance pluri-annuelle. Aquifère : granite fissuré sous altérite. Réf. CIEH.

Ensembles hydrogéologiques Paramètres cartographiables	A	B	C	D	E
<b>1. LITHOLOGIE</b>					
• éventail lithologique très large	X				
• essentiellement du sédimentaire récent		X	X		
• essentiellement du sédimentaire ancien			X	X	
• essentiellement du socle ancien				X	
• essentiellement des terrains métamorphiques				X	
• essentiellement des terrains volcaniques				X	X
<b>2. HYDROLOGIE</b>					
<b>a. Systèmes aquifères</b>					
* gamme variée de systèmes aquifères	X				X
* systèmes multicouches aux nappes profondes continues		X	X		
* nappes discontinues dans des zones fortement fissurées			X	X	
* systèmes karstiques dominants	X				
<b>b. Limites des aquifères</b>					
* bien tracées	X	X	X		X
* difficilement définissables			X	X	
<b>c. Flux entrants (modes d'alimentation liés aux zones climatiques)</b>					
* ponctuels (eaux de ruissellement et cours d'eau alimentant)		X (zone aride)	X		
* eaux météoriques		X (zone humide)		X (zone humide)	
* alimentation mixte	X	X (zone semi-aride)			X
<b>d. Flux sortants (émergences liées aussi aux zones climatiques)</b>					
* ponctuels (sources et cours d'eau drainant)	X dominant	X (zone humide)		X	X
* étendues (zone d'évaporation chotts et Sebchas)		X (zone aride et semi aride)	X		

Ensembles hydrogéologiques Paramètres cartographiables	A	B	C	D	E	
e. Bathymétrie (profondeur de la ressource)						
* faible ( 10 m)	X			X		
* moyenne (de 100 à 300 m)	X	X			X	
* importante ( 300 m)	X	X	X			
f. Productivité						
* variable	X		X			
* importante		X				
* moyenne					X	
* faible				X		

BIBLIOGRAPHIE

Abrokwa - AMPADU (1984) the volta river hydro-électric project in Ghana - in hydro environmental indices ; a review and evaluations of their use in the assessment of environmental impacts of water projects - UNESCO PRESS, PARIS 1984.

ANON : tectonique de l'Afrique - tectonics of Africa, UNESCO PRESS, Paris 1971 (série sciences de la terre - Earth sciences).

ANON : débit de certains cours d'eau du monde, discharge of selected rivers of the world : UNESCO PRESS, vol. I, II et III, PARIS 1974.

BAUMGARTNER A et REICHEL E (1975) world water balance - edition ELSEVIER 1975.

BERAN M.A. et RODIER J.A. (1985) hydrological aspects of drought - publications UNESCO/WMO (1985) 150 pages.

CARBONNEL J.P. (1986) ressources en eau, hydrogéologie (de l'Afrique de l'Ouest) 8 pages en français.

CEFIGRE (1984) synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie du socle cristallin et cristallophyllien, et du sédimentaire ancien de l'Afrique de l'Ouest - édité par CEFIGRE (France) 1984, 115 pages.

COLLECTIF (1982) hydrogeology of Africa, publishers "NEDRA" (1978) et VN/IZARUBEZHGEOLGIA (1982) in english 356 pages.

DILUCA C. et MULLER W. (1985) evaluation hydrogéologique des projets d'hydraulique en terrains cristallins du bouclier Ouest - African publication du BGR Hanovre (RFA) février 1985, 108 pages.

GIDROMETEOIZOAT/LENIGRAD/UNESCO PRESS PARIS (1977) Atlas of world water balance.

GUIRAUD R. (1986) tectonique post-hercynienne en Afrique du Nord et de l'Ouest 40 p en français.

INSTITUTO DE HIDROLOGIA/UNESCO (1979) balance hidroco mundial y recursos hidraulicos de la tierra - 1979 - p. 332 à p. 393.

MARGAT J. (1985) hydrologie et ressources en eau des zones arides in bull. Soc. Géol. France 1985 (8) t. 1 n° 7 p. 1009 à 1020.

MICHARD M. (1976) Eléments de géologie marocaine. Note et mémoires du service géologique n° 252 RABAT.

MARGAT J. (1987) initiation à la dynamique des eaux souterraines (alimentation, écoulement, régime) in CEFIGRE/ITCWRM.

COLLECTIF/BRGM (1969) interprétation des variations naturelles du niveau des nappes aquifères en Mauritanie et au Sénégal (doc. CIEH/BRGM DAK7, 1969, DAKAR).

PETIT MAIRE N. (1984) le Sahara, de la steppe au désert, la recherche n° 160 - p. 1372 à 1382.

RODIER J.A. (1981) phénomènes hydrologiques extrêmes - sécheresses et crues exceptionnelles in proceedings of scientific sessions - international conference on hydrology and the scientific bases for the rational management of water resources PARIS 18-27 August 1981.

UNESCO (1978) world water balance and water resources of the earth p. 251 à p. 307.

WILLIAMS M. (1983) geology of Sahara desert - edited by J.L. Cloudsley Thompson - PERGAMON PRESS (1983) p. 31 à 39.

ARCHAMBAULT (1987) "réflexions sur l'alimentation et l'évaporation des nappes phréatiques en Afrique subsaharienne" in bulletin HYDROGÉOLOGIE n° 2, 1987, pages 69 à 78 Edition BRGM.

C O M M U N I C A T I O N 4

TITRE : LA CARTE DE POTENTIALITE DES RESSOURCES EN EAU  
SOUTERRAINE DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE ET CENTRALE.

AUTEUR : J.L. HENRY  
GEOHYDRAULIQUE - SOGREAH  
B. MOUSSIE  
BRGM



## 1. L'ESPRIT DU PROJET

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) a élaboré en collaboration avec Géohydraulique une carte des ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest en vue du développement.

Ce document a été établi à la demande du CIEH sur un financement de la Commission des Communautés Européennes (CCE).

La conception de cette carte est fondée sur une double nécessité, ressentie par les décideurs politiques de la Commission :

- Disposer d'informations en langage clair pour juger de la factibilité de développement fondé sur la maîtrise de l'eau souterraine, sur l'ensemble du territoire concerné (1). Seule une expression cartographique synthétique peut apporter cette information.
- Promouvoir une méthode d'évaluation qui ne soit pas entachée de la subjectivité des conditions de recueil des données de base, très différentes selon les Etats.

A travers cette cartographie et sa notice explicative, la Commission souhaite disposer d'un instrument susceptible de prolonger la durée de vie du travail réalisé au-delà de ce que l'on attend généralement de cartes. Pour ce faire (fig. 1) :

- La méthode de cartographie, assistée par ordinateur, est évolutive et révisable en fonction de connaissances nouvelles, de mutations technique et de variations socio-économiques.
- La méthodologie, par effet de "ZOOM", et pourvu qu'une densité d'informations suffisante soit disponible, peut être transposée à diverses échelles sans distorsion d'esprit, à des Etats, régions ou territoires.

---

(1) soit 24 Etats : Mauritanie, Sénégal, Gambie, Cap Vert, Guinée, Guinée Bissau, Libéria, Sierra Leone, Côte d'Ivoire, Ghana, Togo, Bénin, Nigéria, Cameroun, Mali, Burkina Faso, Tchad, Niger, Guinée Equatoriale, Gabon, Centrafrique, Congo, Sao Tomé et Príncipe.

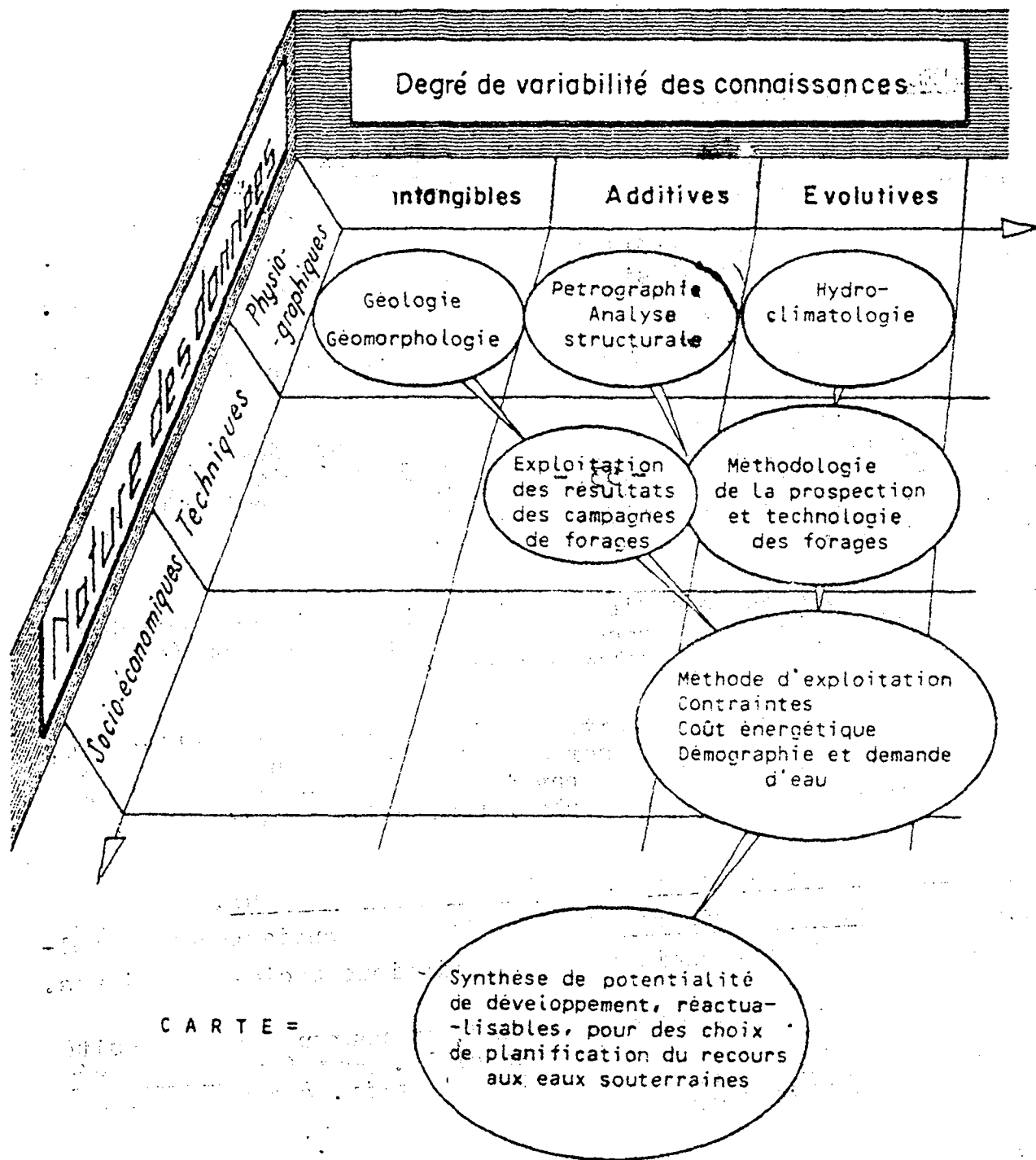


Fig. 1 - "CHEMIN LOGIQUE" POUR L'ELABORATION D'UNE CARTOGRAPHIE DECISIONNELLE ET EVOLUTIVE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

- La notice de la carte comporte un "cahier des charges" tel que la Commission puisse ultérieurement imposer dans ses marchés une méthodologie "normalisée" de présentation des résultats des campagnes de forages d'eau ; ainsi disposera-t-on pour des rééditions futures, de données synthétiques et homogènes pour faire progresser sans pertes d'information coûteuse, la connaissance des eaux souterraines.

Les grandes lignes de cette opération, définies entre les représentants de la Commission et des opérateurs, ont été complétées par des propositions méthodologiques élaborées au cours de l'avancement du travail.

La méthodologie s'inspire, au départ, du fait que la carte doit offrir toutes les possibilités de développement ; elle doit donc traiter sans emphase les ressources les "meilleures" et ne pas négliger les plus modestes. S'agissant particulièrement de développement autocentré et de réalisations villageoises, il ne fallait pas "écraser" les petites ressources disséminées sous le poids de quelques aquifères rares, localisés mais privilégiés. Le caractère approprié de faibles ressources locales s'exprime notamment au travers de leur maîtrise directe par de nombreuses mais petites collectivités. Cet objectif socio-économique est moins délicat à réaliser et à maîtriser dans l'immédiat pour ces aquifères que de grands projets d'exploitation de nappes profondes, qui s'apparentent à bien des égards à des aménagements de type "barrage". Enfin, ces grandes nappes n'existent guère dans la zone qui requiert le plus d'efforts pour le développement, c'est-à-dire la bande soudano-sahélienne : la nature géologique de l'Afrique canalise les choix.

## 2. CARTOGRAPHIE DECISIONNELLE ASSISTEE PAR ORDINATEUR, METHODE ADOPTEE

Il fallait donc simultanément :

- Eviter le jargon technique et la symbolique graphique des cartes hydrogéologiques réservées aux seuls professionnels.
- Eviter la rapide obsolescence d'un document coûteux que l'on "ne refait pas souvent".
- Mettre les choix à la portée des décideurs, sans bloquer, dès l'origine de l'élaboration, les options de légende et de valeurs numériques, objets de la carte.

Pour atteindre ces trois objectifs, nous avons proposé la "cartographie décisionnelle assistée par ordinateur" ; la méthode permet de prendre en compte les divers paramètres mieux que de façon simultanée, de manière inter-active.

1. Les phénomènes hydrogéologiques cartographiés sont transcrits en trois facteurs simples, descriptifs d'une ressource en eau souterraine dans tous ses aspects, notamment économiques : accessibilité, exploitabilité, sûreté.

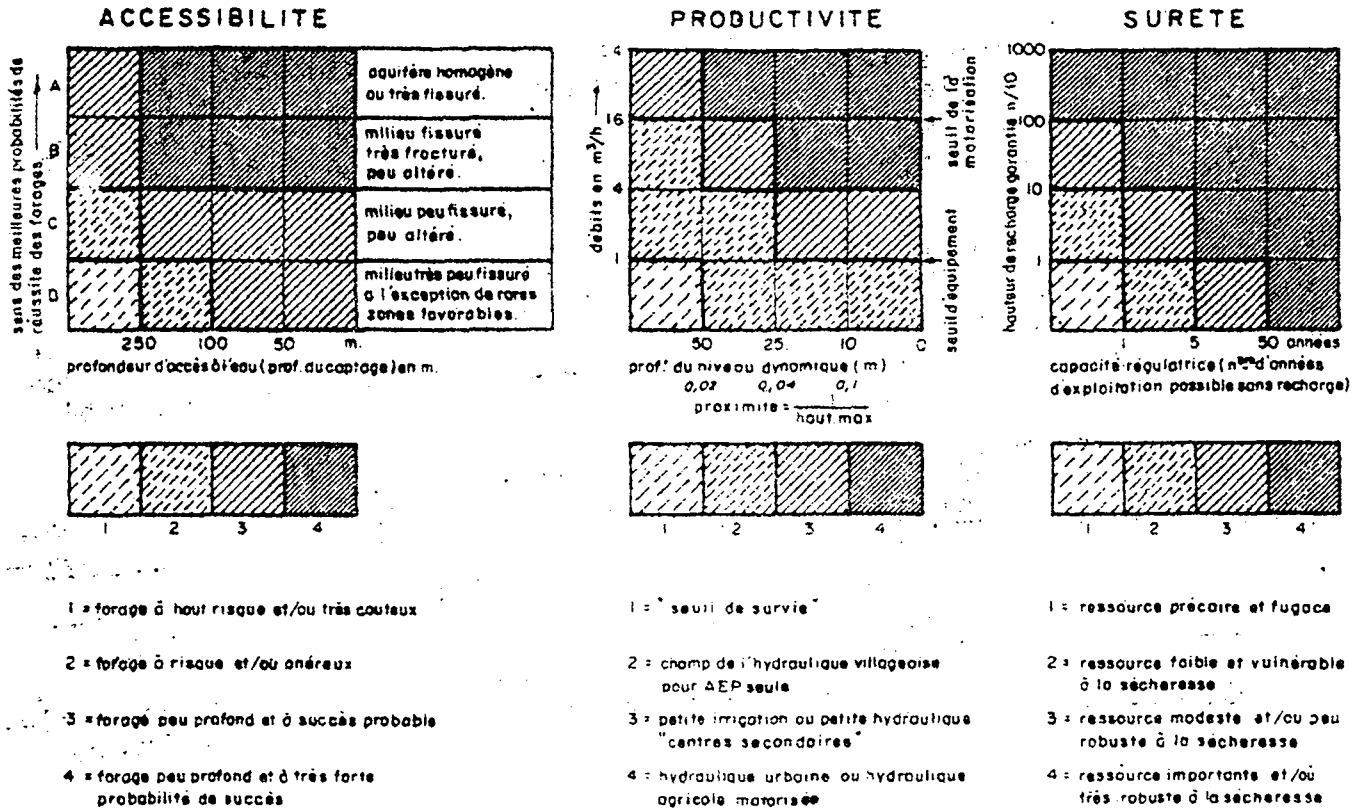
Ces facteurs sont formés par intégrations de données "élémentaires mais synthétiques", c'est-à-dire les données issues de synthèses régionales alimentées par les campagnes de forages (cf. annexe I, exemple de fiche de forage informatisée - chaîne HIVI). La formation des trois facteurs par trois couples de paramètres hydrogéologiques pertinents permet donc une présentation dépouillée de tout jargon technique.

2. La saisie informatique permet de garder les facteurs stables et de modifier pour réactualisation, les seuls facteurs dont la connaissance a progressé ou dont les conditions socio-économiques ont été modifiées.
3. L'élaboration d'une carte aux objectifs aussi ambitieux ne peut être réalisée que par processus itératifs.

Ainsi, par exemple, il faut sans cesse retourner à l'analyse des "valeurs de coupure" des paramètres techniques pertinents (perméabilité, débit) pour effectuer la synthèse combinatoire des descripteurs de la ressource (fig. 2).

Il convient par ailleurs, comme on l'a vu, de présenter équitablement toutes les ressources, l'importance ponctuelle ou le volume exceptionnel de certaines ne devant pas laisser dans l'ombre des ressources modestes mais dont le rôle socio-économique peut être considérable.

## Association de 3 facteurs



### Synthèse combinatoire sommaire (dans cet exemple, sans pondération)

On aboutit donc à un exemple de classification (mais on peut en imaginer de nombreuses variantes selon les limites adoptées et les pondérations retenues)

**Classe I** - terrain défavorable, limitation à la seule recherche d'eau potable sur structures identifiées

**Classe II** - terrain peu favorable, possibilités médiocres, peu économiques, risque d'échec élevé

**Classe III** - terrain favorable, possibilités d'aménagement avantageux, à risque modéré

**Classe IV** - terrain très favorable, larges possibilités d'aménagement présentant de bons rapports économiques et risque minimal.

	1	2	3	4
1	1.1.1	1.2.1	1.3.1	1.4.1
2	2.1.1	2.2.1	2.3.1	2.4.1
3	3.1.1	3.2.1	3.3.1	3.4.1
4	4.1.1	4.2.1	4.3.1	4.4.1

	1	2	3	4
I	18	22	26	30
II	22	26	30	34
III	26	30	34	38
IV	30	34	38	42

fig.2- Exemple de procédure d'établissement de la légende d'une cartographie décisionnelle des ressources en eau souterraine

Pour atteindre cet objectif, il faut "étaier l'histogramme" des valeurs et pondérer, dans la synthèse combinatoire finale, les éléments dont le poids entraînerait une distorsion de l'image cartographique.

A ce stade, celui de la pondération, et pour mettre en lumière ce que les responsables de la politique d'aménagement souhaitent privilégier, il est souhaitable que l'opération soit exécutée avec leur participation, c'est-à-dire devant une "console graphique", en "mode inter-actif".

En résumé, la cartographie décisionnelle des ressources en eau souterraine assistée par ordinateur est le moyen de présenter tous les choix, et de faciliter au décideur la manière de concrétiser sur un document graphique celui (ou ceux) qu'il souhaite étudier plus avant. Le processus n'est donc jamais figé. Appliquée à une échelle spatiale appropriée, la méthode permet donc d'identifier les secteurs favorables au type de développement cohérent avec les objectifs socio-économiques et les moyens techniques disponibles.

COMMUNICATION N° 5

TITRE : APPLICATION DU SYSTEME DE CARTOGRAPHIE  
ASSISTEE PAR MICRO-ORDINATEUR ARC/INFO  
POUR LES ETUDES DES RESSOURCES EN EAU  
EXECUTEES DANS LES PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT

AUTEUR : R.J.M. GUNST  
IWACO, BURKINA FASO

1. IWACO B.V. : Bureau d'Etudes en Eau et Environnement

Pays d'origine : Pays-Bas

Nombre d'experts : 150

Domaines d'intervention :

- Etudes des ressources en eau
- L'approvisionnement en eau et assainissement
- Techniques dans le domaine de l'hygiène
- Gestion d'Entreprise et Economie
- Laboratoire.

Pays d'intervention : Pays-Bas

en Afrique Burkina Faso

Niger

Tchad

Mali

Mauritanie

Egypte

Sierra Leone

Soudan

Zambie

Mozambique

en Asie

Indonésie

Bangladesh

Pakistan

Malaisie

Les Emirats Arabes

Le Bureau IWACO à Ouagadougou pour l'Afrique de l'Ouest  
a environ 10 experts expatriés, 5 ingénieurs africains,  
l'effectif du personnel : 50 personnes.

Domaines d'intervention :

- Etudes des ressources en eau
- Gestion des programmes d'hydraulique villageoise
- Approvisionnement en eau potable
- Gestion d'Entreprise et Formation.



2. SGI : SYSTEME GEOGRAPHIQUE INFORMATISE

Dans quels types de projets ?  
- Etudes des ressources en eau  
- Grands projets d'hydraulique urbaine

Réalisations :

- a) Egypte : Etudes des ressources en eau souterraine de la Vallée du Nil.
- b) Emirats Arabes Unis : Etudes des ressources en eau souterraine.

La cartographie de ces deux projets a été faite à l'aide d'une maison d'informatique aux Pays-Bas.

Projets bientôt à équiper avec leur propre SGI :

- a) Burkina Faso : Projet bilan d'eau (voir 6)
- b) Egypte : voir ci-dessus
- c) Indonésie : L'AEP de la ville de BOGOR.

3. SYSTEME EXPLOITE ARC/INFO

Investissements nécessaires	Valeur en FCFA (HTT)
Micro-ordinateur : IBM PS/2 modèle 60	2.100.000
Digitalisateur Calcomp	2.400.000
Table traçante Ao	4.400.000
Total appareils	8.900.000
Logiciel ARC/INFO	4.100.000
GRAND TOTAL	13.000.000

4. COURS D'ACTIVITES POUR UNE ETUDE DES RESSOURCES EN EAU

N°	Activités	Exécutée où ? P-dans le pays S-au siège en Europe
a	Acquisition des données techniques	P
b	Saisie de la base topographique	P
c	Traitements simples des données, conversions, combinaison des données etc	P
d	Etablissement des cartes de travail sur table traçante	P
e	Formation du personnel national	P/S
f	Impression des cartes définitives	S
g	Traitements cartographiques plus compliqués (p.e. polygones de Thiessen, courbes etc)	S

La qualité des cartes à rédiger dépend directement de la qualité de la banque des données techniques.

5. DESCRIPTION DES ACTIVITES

a) Acquisition des données techniques

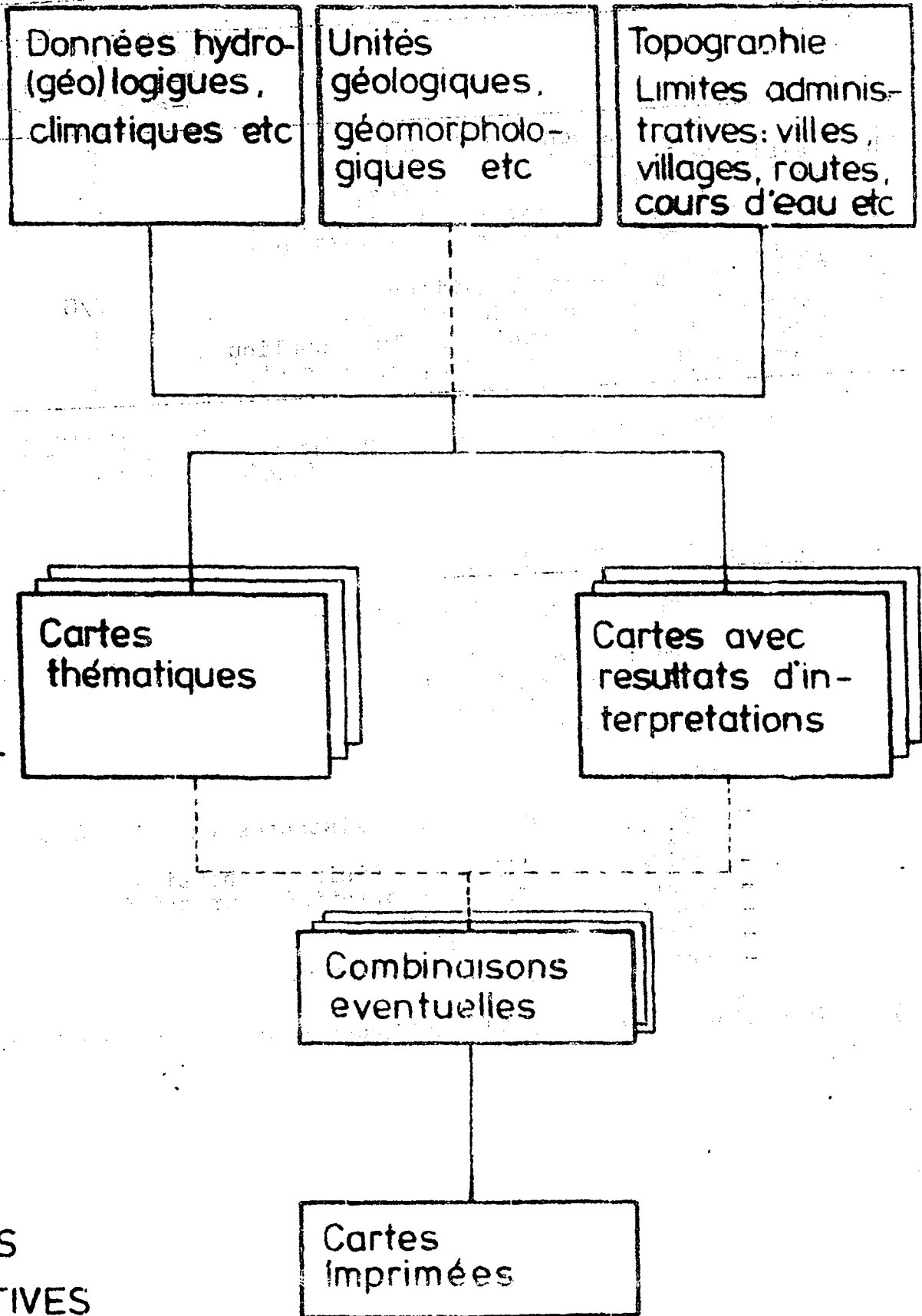
Nature : hydrologie  
hydrogéologie  
pluviométrie  
climatologie

Actions :

- Inventaire des données existantes (savoir où se trouve quoi ?)
- Décider ce qu'il faut saisir (= choisir)
- Développer système informatisé pour saisie
- Recueillir les données
- Saisir données acquises
- Contrôle des données acquises.

b) Mode d'opération pour l'établissement des cartes (voir schéma).

# ETABLISSEMENT DES CARTES



c) Création banque de données cartographiques

-----	
I Sources d'information	Moyens de saisie
-----	
Cartes existantes	Digitalisateur
Autres banques de données p.e. DBASE III +, DATAFLEX	Conversion, clavier
Images "numériques" de satellites etc.	Interprétation informatisée
-----	
-----	
II Type de données	Exemples
-----	
Points	Villages, points d'eau
Lignes	Routes, cours d'eau
Polygones	Unités administratives
-----	

d) Fonctions de ARC/INFO

I Pour la création d'une banque de données cartographiques :

- saisie des données
- conversion d'un système de coordonnées à l'autre
- correction des données (notamment recouvrement partiels de différentes sources d'information )
  - \* correction mathématique
  - \* correction graphique sur l'écran (feuille en caoutchouc)

II Traitements des données préalables à la cartographie

- Traitements logiques
- Calculs
- Classifications
- Sélections
- Etablissement des tableaux

### III. Traitements cartographiques

- a) Combinaison de deux ou plusieurs systèmes de polygones qui couvrent la même région pour créer un nouveau système de polygones avec plusieurs caractéristiques.

p.e.

système de polygones 1 : les zones climatiques

système de polygones 2 : les unités géologiques

système de polygones 3 : (à créer) combinaison de 1 et 2

- b) Définition de symboles graphiques pour les applications d'ingénierie  
par exemple : les éléments d'un réseau de distribution d'eau potable

- c) Calculs de polygones de Thiessen \*

- d) Calculs de courbes \*

- e) Calculs des superficies, longueurs

- f) Indication des zones d'influence et calcul de leur superficie

- g) Classification des données pour indication sur la carte avec symbole de la classe concernée

### IV. Dessin des cartes sur table traçante

- V. Préparation des fichiers pour envoyer à l'imprimeur.

6. APPLICATION AU BURKINA FASO

Projet : Etude du Bilan d'Eau du Burkina Faso  
 : Client : DEP/Ministère de l'Eau  
 : Financement : Pays-Bas  
 : Objectif : Etablissement d'un Plan Directeur (PD)  
 pour la gestion des ressources en eau du  
 Burkina Faso  
 : Durée : 3 ans.

Méthode de travail : le PD sera fait après chaque année de travail sur la base des données alors disponibles. Ainsi on peut voir quelles sont les lacunes de connaissance et y adapter le programme de recherches pour l'année prochaine.

- Activités
- Création banque de données techniques
  - Recherches des processus hydrogéologiques et hydrologiques etc.
  - Création d'un réseau piézométrique national
  - Création d'une cellule dans la DEP du Ministère de l'Eau dont le personnel sera chargé graduellement avec la préparation et rédaction des versions futures du PD
  - Formation de ce personnel.

Planification des activités directement liées à l'établissement du PD	ANS		
	1	2	3
Etablissement du système informatisé			
Saisie des données			
Contrôle saisie des données			
Interprétation des données saisies			
Planification de la gestion			

Fonctions du SGI	ANS du Projet		
	1	2	3
Contrôle des données	*	*	*
Présenter les données de base	*	*	*
Présenter les cartes interprétatives		*	*
Préparation des cartes de planification définitives pour impression en Europe			*

Possibilités multiples pour les cartes de planification :

EXEMPLES :

- Cartes des besoins en points d'eau qui tiennent compte de :
  - \* population habituelle ou future
  - \* bétail
  - \* degré de satisfaction actuel (points d'eau existants débits etc)
  - \* difficulté de créer des forages (taux de succès d'autres programmes dans la région)
  
- Cartes des prix estimés d'un forage ou par personne desservie ;  
estimation basée sur :
  - \* prix actuel de forages
  - \* profondeur nécessaire
  - \* taux de succès.

COMMUNICATION 6

TITRE : GESTION DES RESSOURCES EN EAU AU NIGER  
STRUCTURE ET DEVELOPPEMENT DE L'INFORMATION  
DES RESSOURCES HYDRAULIQUES.

AUTEUR : G. SAVARY  
CONSEILLER MRAIH - DRE



## INTRODUCTION

La gestion de l'eau au Niger a connu un nouvel essor en 1986 lors de la mise en route d'un Inventaire des Ressources Hydrauliques (financement Suisse DDA, régie IUED).

Cet inventaire devait fournir l'information de base pour l'édition par arrondissement d'un modèle d'Atlas des Ressources Hydrauliques qui soit un outil efficace pour la prise de décision concernant la situation hydraulique du territoire.

Parallèlement, s'effectue la mise en place d'un système de gestion informatique des données qui permettra une automatisation et une efficacité de plus en plus grandes (financement FAC et DDA).

## INVENTAIRE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES (IRH)

L'inventaire de ressources hydrauliques en cours dans plusieurs départements du Niger a commencé sur Niamey en 1986.

Il se veut un inventaire systématique sur le terrain de tous les points d'eau existants : il consiste à visiter chaque village et chaque point d'eau pour permettre l'établissement de deux types de fiches d'inventaire contenant leurs caractéristiques (fig. 1) :

- la fiche de village qui contient les informations géographiques (localisation, population, infrastructures sociales, bétail, cultures...) et les données liées aux ressources (récapitulation des points d'eau. Chaque village possède son numéro : l'indice de classement.

- la fiche de points d'eau qui contient toutes les informations disponibles (géologie, caractéristiques hydrodynamiques, matériel mis en place et maintenance). Chaque point d'eau souterrain est identifié par son numéro IRH et l'indice de classement du village où il se trouve.

## UTILISATION DE L'INFORMATIQUE

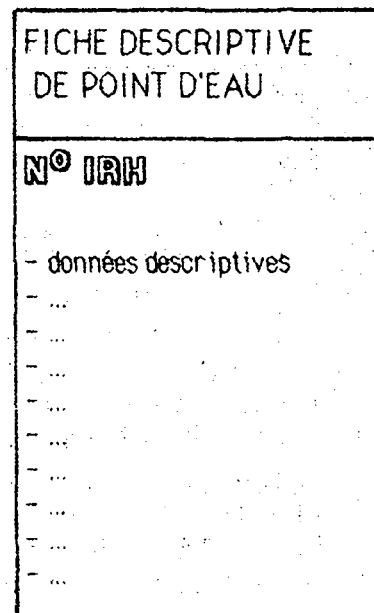
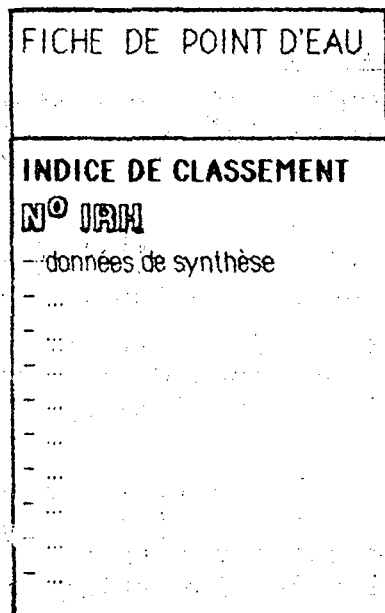
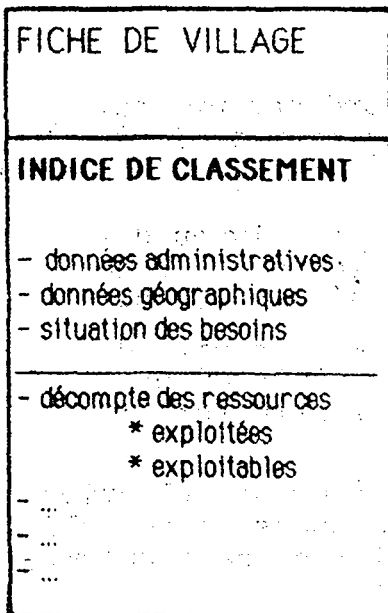
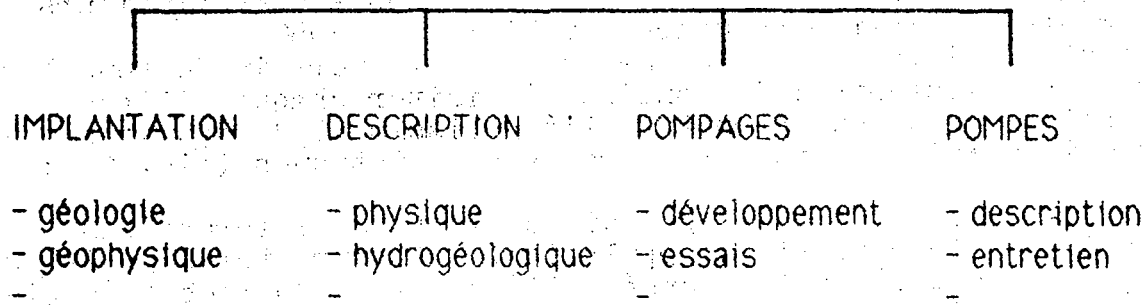
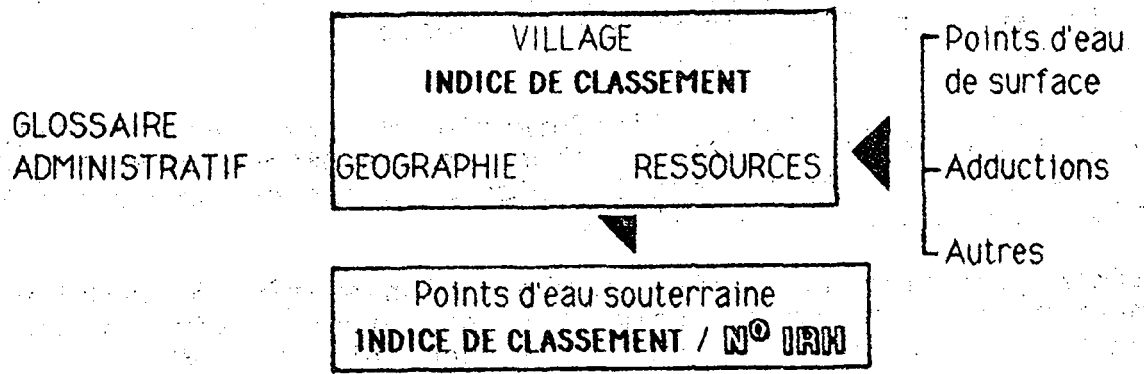
Ce fichier manuel est ensuite saisi sur micro-ordinateur pour constituer le fichier informatisé dont le classement se fonde sur l'indice de classement du village et le numéro IRH des points d'eau (fig. 1).

Dans le futur, la saisie se fera principalement au niveau des programmes d'hydraulique villageoise, tant que les mises à jour seront faites par les structures adéquates des départements.

Le nombre de fiches n'est ainsi limité que par la capacité de stockage du matériel informatique. Cette architecture en parallèle extrêmement souple facilite toute évolution et restructuration ultérieure du fichier.

Le fichier peut être trié selon différents critères de sélection pour établir les listes d'intervention des programmes d'hydraulique. La qualité des documents extraits du fichier ne peut qu'améliorer la prise de décision des investissements.

# SCHEMA DE STRUCTURATION DES BASES DE DONNEES fig. 1



2 fiches : - géographie  
- ressources

1 fiche avec informations minimales

1 fiche par type de description

## ATLAS DES RESSOURCES HYDRAULIQUES (ARH)

Dans les années 84-85 est né le projet d'un Atlas des Ressources Hydrauliques du Niger par arrondissement.

Cet Atlas veut donner une vision synthétique de l'essentiel des informations disponibles sur les villages et particulièrement les informations relatives à l'eau.

Il veut donc être un outil de base pour faciliter les décisions d'investissement dans le domaine de l'hydraulique mais également pour fournir des informations à d'autres utilisateurs.

L'Atlas s'adresse d'abord à tous les décideurs de l'administration, à l'échelon national comme à l'échelon local.

Une maquette éditée en 1986 a été soumise à consultation. Le premier exemplaire de l'Atlas, actuellement en préparation, est le fruit d'une concertation de l'ensemble des cadres nationaux de l'Hydraulique.

Contenu de l'Atlas : il comprend trois parties : une introduction, des fiches d'atlas et des cartes synthétiques :

La partie texte est réduite à l'essentiel : une introduction sur la géologie, les eaux de surface et les eaux souterraines avec un lexique des termes techniques minimaux auquel se référer.

Les fiches d'atlas constituent la majeure partie du document : chaque village inventorié possède sa fiche qui résume les informations principales tirées des inventaires de terrain (fig. 4 et 5).

Sur chaque fiche, on trouve :

- un extrait de la carte topographique au 1:200'000 qui permet de repérer rapidement le village,
- un croquis du terrain pour situer les points d'eau par rapport au village,
- une situation administrative du village (département, arrondissement, canton, secteur) de même que son numéro de référence (indice de classement) et ses coordonnées géographiques,
- une estimation des besoins en eau d'après le nombre d'habitants, la présence d'équipements sociaux, de bétail et de cultures,
- le recensement des infrastructures hydrauliques existantes et des informations sur l'eau elle-même (profondeur, terrains, abondance et qualité),
- une appréciation de la situation hydraulique actuelle, c'est-à-dire le degré de satisfaction des besoins humains, pastoraux ou agricoles.

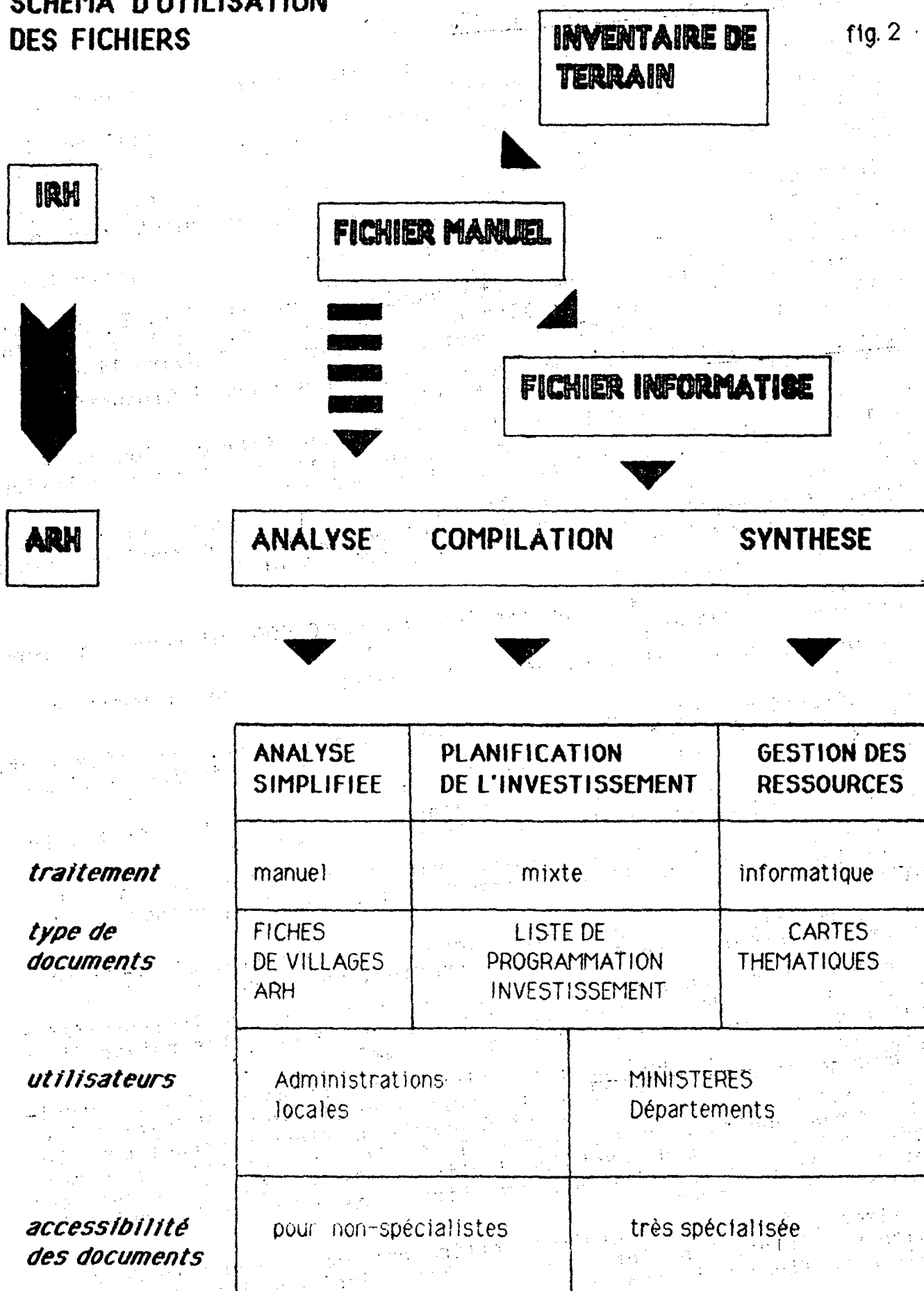
Les cartes synthétiques permettent une vue d'ensemble de la répartition de telle ou telle donnée dans une région : par exemple les points d'eau modernes ou la profondeur de l'eau sous le sol.

Utilisation de l'informatique : ces fiches d'atlas sont éditées actuellement de façon semi-automatique : à partir du fichier IRH informatisé pour la partie ressources en eau et à partir du fichier manuel pour la partie cartographique. Dans le futur, le traitement des données permettra de créer des documents de synthèse destinés à la gestion des ressources en eau et à la planification des investissements ; les cartes thématiques en sont un exemple type.

Les remises à jour des inventaires utiliseront comme documents de base les fiches d'Atlas, les fiches IRH manuelles ainsi que les éditions extraites du fichier informatique.

# SCHEMA D'UTILISATION DES FICHIERS

fig. 2

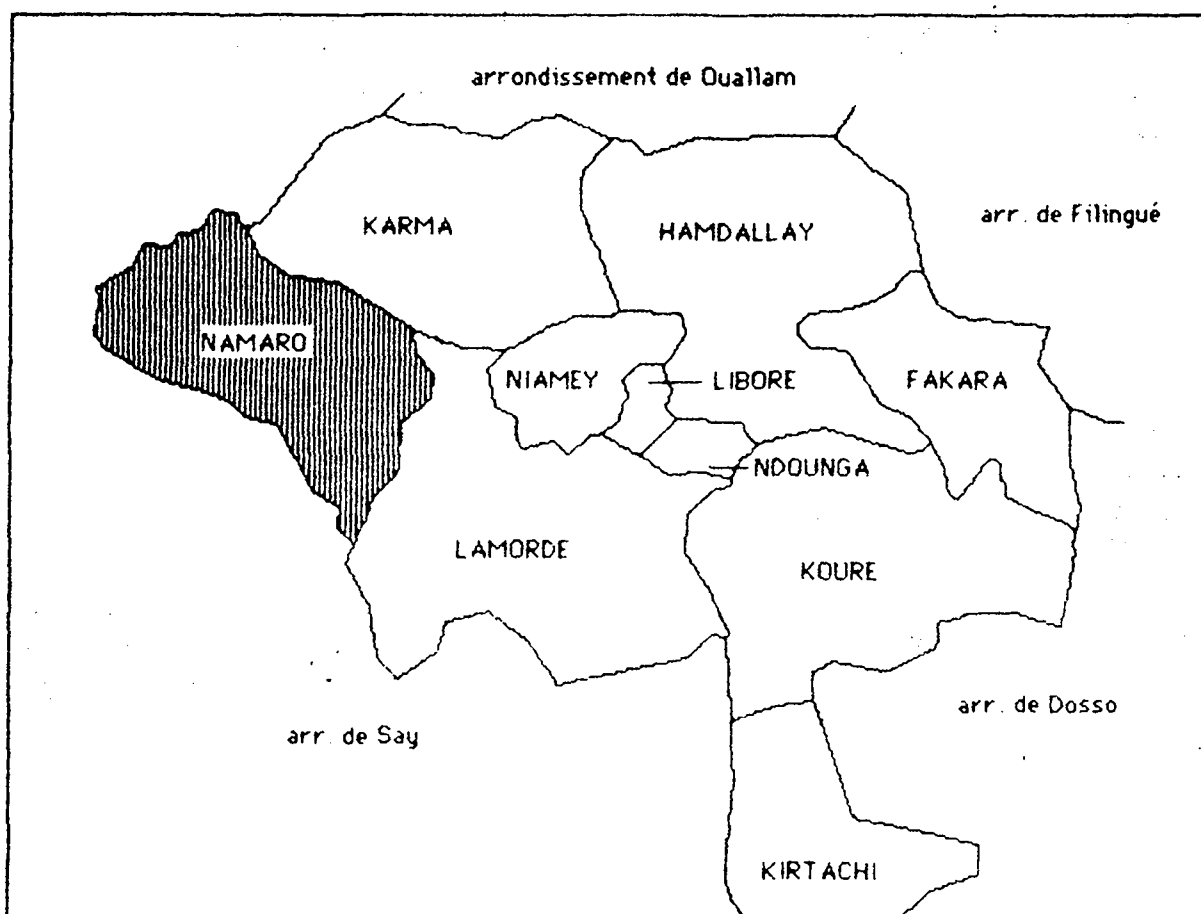


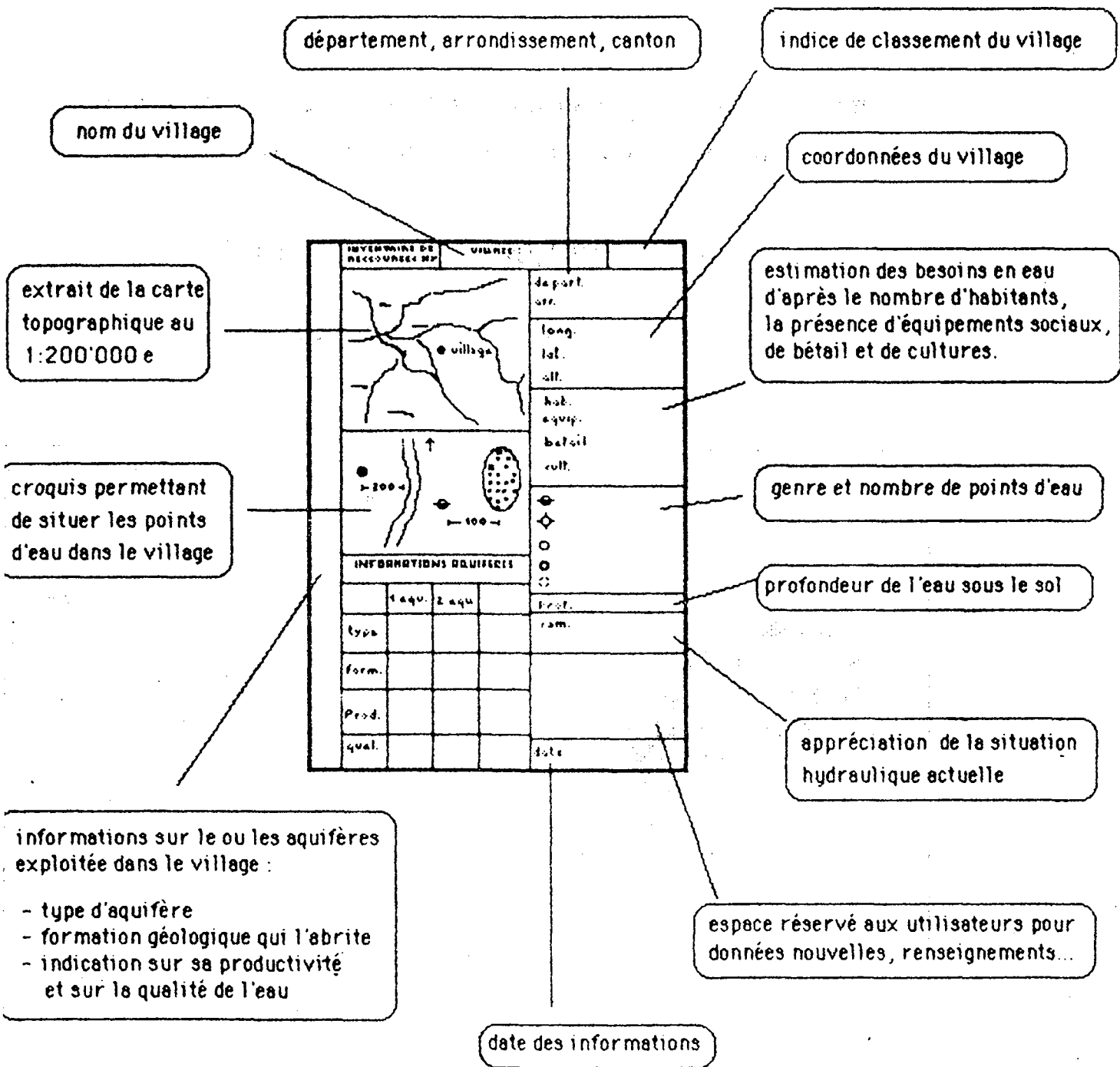
N.B. : IRH = Inventaire des Ressources Hydrauliques  
ARH = Atlas des Ressources Hydrauliques









ATLAS DES RESSOURCES HYDRAULIQUES  
DU DEPARTEMENT DE NIAMEY

ARRONDISSEMENT DE KOLLO

CANTON DE NAMARO





REPUBLICQUE DU NIGER INVENTAIRE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES		Village :		fig. 5				
				Département :				
				Arrondissement :				
				Canton :				
				Secteur :				
				Longitude :				
				Latitude :				
				Altitude :				
				Habitants :				
				Equipements sociaux :				
				UBT :				
				Hectares :				
				Débit total nécessaire :	m <sup>3</sup> / J			
				 Puits traditionnels boisés :  Puits traditionnels améliorés :  Puits cimentés : +... privés  Puits maraîchers :  Forages exploitables : +... non exploit.  Piézomètres :  Zone de puisards :  Adduction d'eau : Mares :				
				INFORMATION SUR LES AQUIFERES				Profondeur moyenne de l'eau sous le sol :
					PRINCIPAL AQUIFERE EXPLOITE	AQUIFERE SECONDAIRE	AUTRE AQUIFERE	Situation actuelle : - nombre total de pompes : - approvisionnement humain : - approvisionnement pastoral : - approvisionnement agricole :
				TYPE D'AQUIFERE				
				FORMATION GEOLOGIQUE				
				PRODUCTIVITE				
				QUALITE DE L'EAU				Remarques :
				Date :				

COMMUNICATION 7

TITRE : FORMATION CONTINUE A L'UTILISATION DES METHODES  
GEOPHYSIQUES POUR LA RECHERCHE DE L'EAU  
UNE EXPERIENCE RECENTE MALI - NIGER.

AUTEURS: D. CHAPPELLIER  
INSTITUT DE GEOPHYSIQUE  
UNIVERSITE DE LAUSANNE  
  
J. ROZ MUSKI  
PEDAGOGIE EPFL  
EXPERT AUPRES DE L'UNESCO



## FORMATION CONTINUE A L'UTILISATION DES METHODES GEOPHYSIQUES POUR LA RECHERCHE DE L'EAU - UNE EXPERIENCE RECENTE MALI - NIGER.

### INTRODUCTION

Lors de l'établissement de cartes de planification des ressources en eau souterraine, l'hydrogéologue dispose d'un grand nombre de connaissances qui résultent de la mise en oeuvre de plusieurs disciplines complémentaires.

Parmi ces disciplines, la géophysique apporte des données sur la géométrie du réservoir, sur sa nature lithologique et sur l'évolution de ses caractéristiques.

Pour pouvoir fournir ces renseignements le géophysicien doit non seulement savoir exécuter les mesures, mais aussi pouvoir les transposer, les traduire en termes géologiques directement utilisables.

### PORTRAIT D'UN GEOPHYSICIEN

Pratiquement on rencontre plusieurs types de géophysiciens travaillant dans les projets de recherche d'eau.

I. Le technicien opérateur, c'est une personne capable de faire les mesures correctement quelque soit la méthode employée et les conditions de terrain. Son travail ne nécessite qu'un minimum de compréhension de la méthode mise en oeuvre.

II. Le géophysicien A, est capable non seulement de faire les mesures mais aussi de les interpréter. A ce niveau, le géophysicien pourra fournir à l'hydrogéologue une coupe ou une carte géophysique. Il doit posséder de solides bases en géophysique afin que ses interprétations soient cohérentes et rigoureuses.

III. Le géophysicien "Sensu stricto", qui lui sait :

- POSER le problème en termes géophysiques.
- CHOISIR la ou les méthodes appropriées.
- ADAPTER la mise en oeuvre aux conditions particulières du pays ou il travaille.
- FAIRE une synthèse des résultats.
- TRADUIRE et fournir à l'hydrogéologue des résultats directement exploitables.

Ces trois niveaux sont en fait nécessaires. Il existe dans les pays du Sahel de nombreux techniciens opérateurs mais par contre le géophysicien "sensu stricto" est plus difficile à trouver.

Le Mali, par exemple, possède une Ecole d'Ingénieurs ou les élèves suivent un enseignement de base en géophysique, de plus de nombreux ingénieurs sortant de cette Ecole complètent leur formation dans des Universités étrangères.

Le Niger, par contre, assure une formation de géologues dans son Université mais la géophysique n'y est pas dispensée.

Nous voyons ici qu'il existe une disparité entre les différents pays.

L'idée est donc née de former "SUR PLACE" et "A LA CARTE", c'est à dire en s'adaptant aux souhaits du pays d'accueil, des géophysiciens susceptibles de travailler à différents niveaux pour les projets de recherche d'eau.

## HISTORIQUE DU PROJET

Cette idée s'est concrétisée lors de la rencontre de trois organismes : Terre des Hommes - Genève, l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne, I.U.E.D. Genève.

"Terre des Hommes" en effet se trouve souvent confrontée, dans ses projets, au problème que pose une judicieuse implantation des puits et forages. De son côté l'Institut de Géophysique a participé directement et indirectement à l'organisation d'équipes d'hydrogéologues et de géophysiciens chargées précisément de ce genre d'implantation.

Avec la collaboration du Ministère de l'Hydraulique nous avons donc organisé au Mali, une formation en géophysique répartie sur trois ans à raison d'environ 6 semaines par année.

Ce cycle de cours a rencontré un vif succès, il a été suivi la première année, 1985, par 16 personnes, puis par 30 personnes en 1986 et 34 participants étaient réunis en 1987.

Ces participants, Maliens et Nigériens, étaient de formation très diverse comme le montre la liste en annexe.

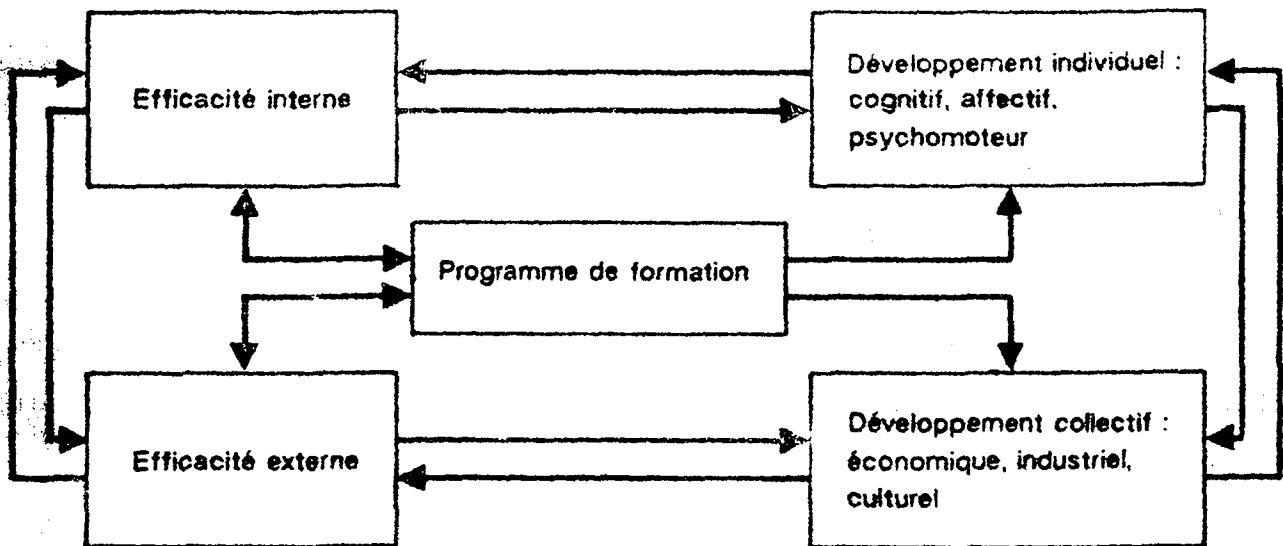
L'enseignement a été dispensé sous forme de cours théoriques, travaux pratiques et stages de terrain. La première année nous avons traité des méthodes gravimétriques et magnétiques, l'année suivante, 1986, les méthodes électriques et les diagraphies de forage, enfin 1987 a été consacré à la sismique réfraction et à une synthèse méthodologique.

A la fin de ce cycle de cours les participants ont répondu à un questionnaire d'évaluation, nous allons maintenant analyser leur réponses.

## EVALUATION

Mesurer l'efficacité d'une intervention pédagogique est une opération complexe et délicate. La difficulté est proportionnelle au nombre de partenaires impliqués dans le projet, à la nature et au degré d'importance socio-économique et culturelle des enjeux dans lesquels il s'inscrit, aux changements directs et aux effets différés qui en dépendent.

Il est généralement utile de distinguer les notions "d'efficacité interne" et "d'efficacité externe" d'une action de formation. La première se rapporte à l'impact de la stratégie didactique mise en oeuvre sur le développement des compétences individuelles des participants. La seconde concerne l'influence de cette intervention sur le développement économique, social, d'un pays ou d'une région. (1)



Nous nous sommes intéressés essentiellement à l'efficacité interne de notre intervention et avons cherché à évaluer sa capacité de contribuer :

- à l'organisation d'apprentissages itératifs pertinents par rapport à la formation continue des cadres locaux.
- à l'élaboration de savoirs opérationnels complémentaires et / ou nouveaux à propos de l'utilisation des méthodes géophysiques pour la recherche de l'eau.

#### A) EFFICACITE INTERNE DU COURS

La procédure d'évaluation utilisée résulte de l'adaptation et de la simplification de certains travaux de référence existants sur ce sujet (2, 3, 4; 5, 6).

Les 34 participants au cours ont répondu en passation directe et anonyme à 13 questions à appréciation multiple concernant :

L'Organisation générale du cours : programme, objectifs, difficulté et adaptation par rapport à leur formation de base et en regard de leurs besoins et de leur préoccupations professionnelles.

## La stratégie pédagogique et les moyens didactiques utilisés :

a) exposés : organisation de la matière, illustrations, stimulation à la réflexion personnelle.

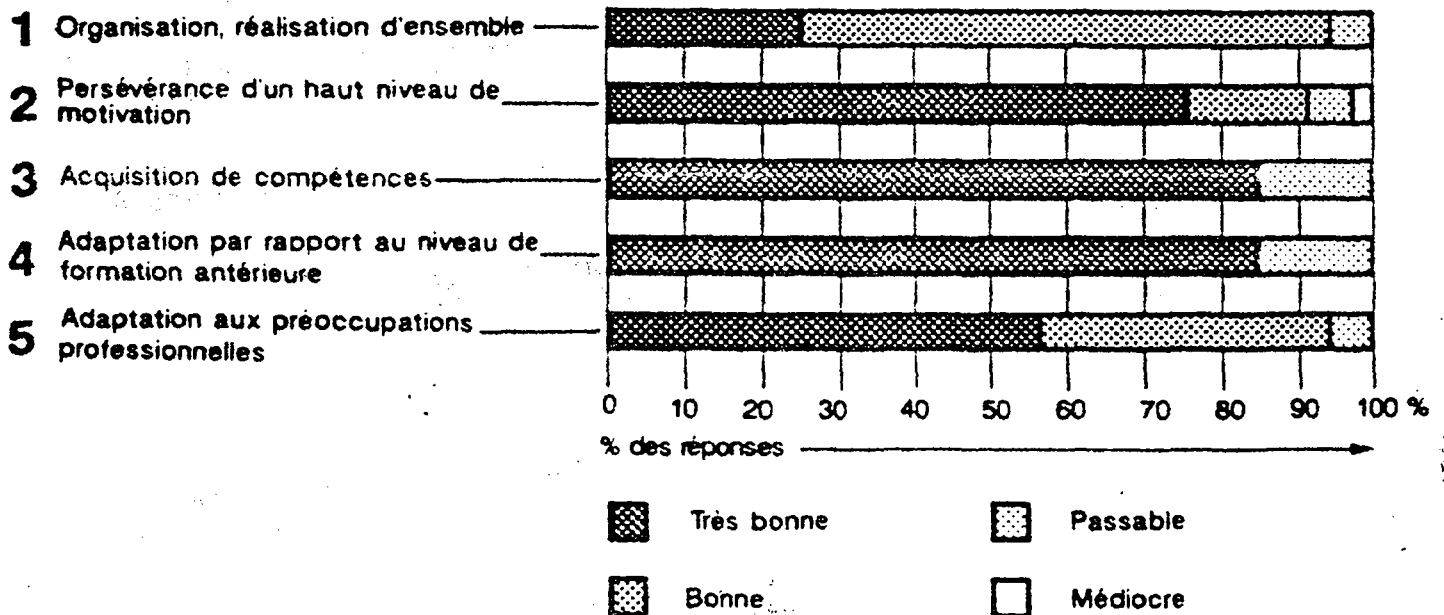
b) exercices et travaux de terrain : liens avec les exposés, le cours, les pré-acquis, les préoccupations professionnelles, pertinence, utilité, clarté des documents fournis.

c) encadrement : attitude, disponibilité, aide des assistants, des collaborateurs et du professeur.

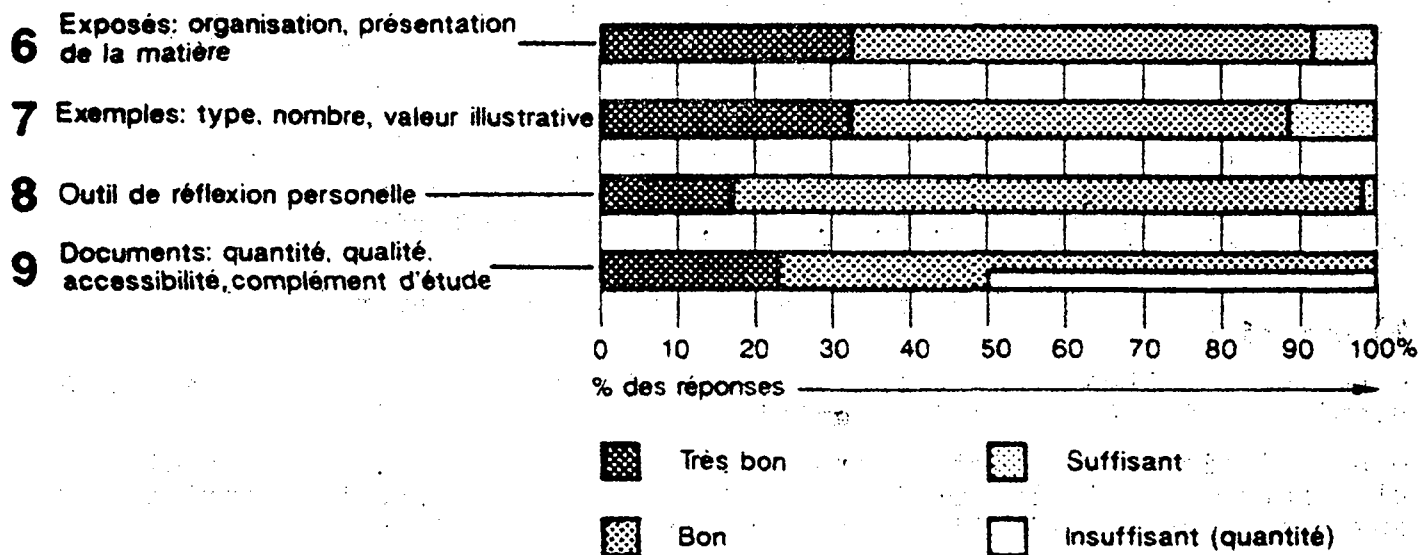
## Remarques et suggestions personnelles

Les résultats obtenus sont généralement très positifs et très homogènes avec un écart-type très faible ( $S_x$  entre 0.15 et 0.49). Cette faible dispersion par rapport à la moyenne est donc une garantie à priori de la bonne recevabilité et de l'efficacité des changements ultérieurs éventuellement apportés au cours sur la base de cette évaluation.

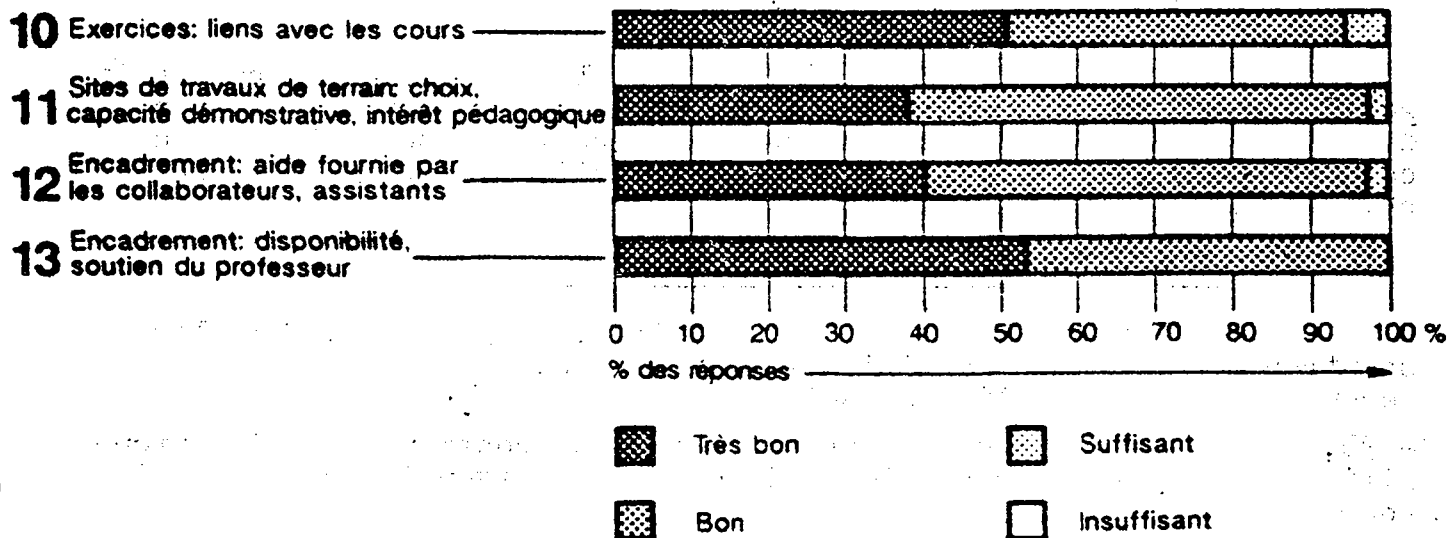
## Appréciation générale du cours



## Appréciation du contenu



## Appréciation des moyens pédagogiques



## B) COMMENTAIRES

L'analyse des réponses et des remarques personnelles qui complètent chacun des 34 questionnaires indique que ce genre d'opération pédagogique ponctuelle est appréciée et qu'elle remplit pleinement son but avec des moyens à la fois modestes et souples.

Un seuil écueil, celui du niveau de formation de base des participants. Environ 6 d'entre eux n'avaient pas les prérequis nécessaires. Cette situation explique la dispersion plus grande des réponses fournies aux questions 3, 4, 7, et 9, et la corrélation très forte ( $r = 0.556$ ) qui existe entre elles.

Le sentiment d'inadéquation entre acquis et prérequis (item 4) entraîne :

- Des difficultés à structurer et à capitaliser les apprentissages, un sentiment mitigé de profit cognitif personnel (item 3).
- Des difficultés d'interprétation, de transposition, et un besoin plus important d'illustrations et d'exemples, se rapportant strictement aux conditions particulières de leur propre pays (item 7).
- Un besoin plus important de documents théoriques d'appoint (démonstrations, descriptions progressives et détaillées) (item 9) permettant ainsi que l'expriment 91 % d'entre eux un approfondissement des connaissances sur les méthodes étudiées.

Parmi les participants dont le niveau de formation correspondait à celui du cours :

- 44 % regrette que cette disparité dans la formation de base ne leur ait pas permis d'approfondir certains domaines théoriques qui les auraient intéressés en tant que spécialistes.
- 56 % regrette que cette disparité leur ait empêché :
  - de prendre un certain recul.
  - de faire un travail parfois plus critique, plus réflexif.
  - de développer davantage encore certaines compétences de synthèse.
  - d'échanger leurs expériences entre eux.

Une plus grande homogénéité de la formation de base et des acquis des participants nous aurait par ailleurs permis de développer davantage certaines questions importantes pour les spécialistes locaux comme : l'utilisation de l'informatique appliquée aux méthodes géophysiques.

## C) RECOMMANDATIONS DES PARTICIPANTS

Le dépouillement des commentaires, suggestions, formulés spontanément par les participants donne lieu, dans l'ordre, aux recommandations essentielles suivantes :

- 93,75 % souhaitent que ce type de formation continue et soit intensifiée, et que le concept pédagogique de l'intervention adoptée soit poursuivi.

- 90,63 % proposent que cette formule soit élargie et offerte non seulement aux géophysiciens et hydrogéologues maliens et nigériens mais à tous ceux des pays de l'Afrique de l'Ouest et que les gouvernements respectifs de tous ces pays conjugent leurs efforts de coopération à ce sujet.

- 78,12 % suggèrent que le cours soit sanctionné par un examen qui donne lieu à un certificat rendant possible un travail ultérieur individuel de diplôme par exemple.

#### D) PERSPECTIVES

L'efficacité de cette intervention de formation continue réside en grande partie dans la réunion d'une série de principes pédagogiques qui sont à la base de l'approche didactique "globale" récemment développée et testée avec succès dans certaines universités américaines (7).

1. Activation des apprentissages
2. Articulation de la pensée
3. Compréhension intuitive
4. Séquenciation des apprentissages
5. Motivation par transfert positif
6. Climat social favorable.

1.) Plutôt que de permettre aux participants de simplement se "saisir de réponses" il leur a plutôt été régulièrement demandé d'essayer de se poser les bonnes questions. Le but visé ici (compte tenu du cadre "formation continue" du cours) était de constamment valoriser l'identité de "spécialistes" plutôt que "d'apprenants" des participants afin qu'ils évitent de s'en remettre trop exclusivement à l'enseignant et/ou aux documents distribués et qu'ils assument ainsi plus naturellement la responsabilité de leurs apprentissages.

2.) Le principe "d'articulation de la pensée" réaffirmant que la pensée (scientifique) naît et ne se développe qu'à travers l'expression en paroles de l'expérience (8) a été activé par le "design" de l'intervention pédagogique.

En mettant régulièrement mais ponctuellement en présence une trentaine de participants géophysiciens, géologues et hydrogéologues, ceux-ci ont appris à partager leurs expériences professionnelles respectives, à relativiser leur point de vue et à argumenter vis à vis d'autres spécialistes de l'eau.

87,5 % des participants reconnaissent spontanément le profit qu'ils ont retiré de cette situation.

3 et 4.) L'importance que nous avons accordé à la "compréhension intuitive" et à la "séquenciation des apprentissages" s'est heurtée comme nous l'avons signalé à une certaine disparité des acquis. Nous sommes partis néanmoins si possible des niveaux de formation effectifs des participants et de la connaissance intuitive qu'ils avaient des domaines, problèmes et méthodes dont il a été successivement question.

Plus de 80 % d'entre eux (item 3 et 4) ont ainsi eu le sentiment de progresser avec une certaine confiance et autonomie et de parvenir à transférer leurs nouvelles compétences sur d'autres situations.

5 et 6). Les appréciations des participants aux items 2, 12, et 13 traduisent le bon fonctionnement des principes de "motivation par transfert positif" et de "climat social favorable" : "envie de faire des progrès pour faire plaisir à celui qui enseigne parce qu'on apprécie la qualité contractuelle, le respect et la sympathie qui caractérisent le cadre pédagogique proposé".

Ces 6 principes pédagogiques n'ont pu réellement bien fonctionner qu'en raison du nombre relativement limité des participants.

L'élargissement de cette opération à l'ensemble des pays de l'Afrique de l'Ouest nécessiterait donc des solutions didactiques originales, si l'on veut pouvoir continuer à les respecter et en tirer profit.

L'une des solutions pourrait consister à transposer à la recherche de l'eau par les méthodes géophysiques l'expérience que l'Université de Montréal a tentée récemment (9). Cette expérience, qui a rencontré un total succès, visait à résoudre, sans perte d'efficacité et avec les mêmes moyens, la question de la qualité de la formation des grands groupes d'étudiants. Elle peut se résumer ainsi : travailler essentiellement à partir de la méthode des études de cas (10, 11) mais faire rédiger les cas et animer des petits groupes par les participants.

#### CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'enseignement "A LA CARTE", prodigué "SUR PLACE" tel qu'il a été mis en oeuvre permet et c'est sa première qualité de s'adapter aux besoins des pays hôtes.

Cette première expérience montre qu'il faudrait dans l'avenir exiger une plus grande uniformité de la formation de base et des acquis des participants. Elle montre aussi qu'il serait souhaitable dans la mesure du possible d'orienter les travaux pratiques et travaux de terrain en fonction de problèmes particuliers qui se posent dans chaque pays.

Signalons enfin que ce genre de coopération très souple permet de soutenir les structures en place et ce à moindre frais, elle peut déboucher sur une collaboration à long terme adaptée dans chaque cas aux problèmes spécifiques des pays d'accueil.

Nous espérons vivement pouvoir renouveler cette expérience dans d'autres pays du Sahel.



Références :

1. B. Barrere, C. Coulibaly, D. Desbois, G. Videl : "Systèmes éducatifs : La problématique de l'efficacité". Conclusions du rapport : "Accès et succès à l'Université". Recherche N° ISBN 2-7166-0289-1 Université Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan. 1986
2. C.F. Page : "Student evaluation of teaching : The American experience" Society for research into higher education. London. 1974
3. W.S. Genova et all : "Mutual benefit evaluation of faculty and administrators into higher education". Cambridge Mass. : Bollinger Publi. CO. 1976
4. M. Champagne : "Questionnaire d'évaluation de cours. Manuel d'utilisation". Chaire de Pédagogie et Didactique. E P F L, 2 ième édition. Lausanne. 1978
5. R. Dufresne : "Guide d'élaboration de questions spéciales". Service de Pédagogie Universitaire. Université Laval Quebec. 1979
6. J. Rozmuski : "L'évaluation des enseignants des Universités et Hautes Ecoles : Résistance psychologique, intégration systémique et quelques règles d'application" = "Cahier spécial : L'évaluation des enseignants". Avril 1983 Université Nationale de Côte d'Ivoire.
7. W.A. Sadler, a. Whimbey : "Apprendre à penser : Une approche globale". Vie pédagogique N° 42. Avril 1986. pp 10-15
8. G.H. Mead : "Mind, self, and society". University of Chicago Peers. Chicago 1962.
9. P. Blondin : "La rédaction des cas et l'animation de groupe : Une solution originale "Bulletin Universitaire de Pédagogie" Assempé" Université Nationale de Côte d'Ivoire. N° 21 Décembre 1987 pp 11-15
10. M.T. Copeland : "The genesis of the case Method in Business Instruction". in "The case Method at the Harward Business School". Ed. Malcolm P. Mac Nair, New York 1954. Mc Graw-Hill pp 25-33.
11. R. Muchielli : "La méthode des cas". Ed. E.S.F. Paris. 1972.

LISTE DES PARTICIPANTS

AG ERLESS Abdine	Ingénieur géophysicien	Mali x +
AG GUIDI Ahmed Mohamed	Ingénieur géologue	Mali .x +
AG MOHAMED Attaher	Hydrogéologue	Mali x
ABOUBAKRINE Alpha	Professeur ENI	Mali +
ALOUSSEINI Malick	Ingénieur géophysicien	Mali .x +
BALLO Bakary	Technicien géologue	Mali .x +
BERTHE Bakary	Etudiant ENI	Mali +
BOUKARY Abdoulaye	Technicien géophysicien	Niger +
BOLLY Belco Idrissa		Mali x +
CISSE Mamadou	Hydrogéologue géophysicien	Mali .x +
COULIBALY Cheick oumar	Hydrogéologue	Mali x +
COULIBALY Oumar	Ingénieur géophysicien	Mali .x +
COULIBALY Louis Kassoum	Ingénieur géophysicien	Mali .
DAO Bakary	Etudiant ENI	Mali x +
DEMBELE David	Géophysicien	Mali .x +
DEMBELE Totégué	Hydrogéologue	Mali x +
DIALLO Elmeymoun Yaro	Géologue	Mali +
DIARRA Siraba	Géophysicien	Mali +
DIABATE Dialaba	Hydrogéologue	Mali x
DIAKITE Ousmane	Géologue	Mali x
DIAKITE Toumani	Ing. Génie Civil	Mali . +
DJIGA Aly	Agent de développement	Mali .
DOUCANSE Boubacar	Hydrogéologue	Mali x
GUERO Abdou	Technicien géophysicien	Niger +
IDRISSA Ibrahim	Technicien géophysicien	Niger.
KONATE Idrissa	Ingénieur géophysicien	Mali .x +
KONE Abdoulaye	Ingénieur géologue	Mali +
LAWALI Brah	Technicien géophysicien	Niger +
MAIGA Boubacar	Ingénieur géophysicien	Mali x +
MAIGA Adama		Mali x +
MAIGA Idrissa Djibril	Ingénieur géophysicien	Mali x +
MAIGA Seidou "	Hydrogéologue	Mali x
MALAM ISSOUFO Ibrahim	Technicien géophysicien	Niger.
MARIKO Adama	Hydrogéologue-géophysicien	Mali .x +
MOUNKORO Kémo		Mali x +
NIARE Saliya	Etudiant ENI	Mali x
OUSSEYNI Moussa	Technicien géophysicien	Niger +
SAMAKE Ibrahima	Hydrogéologue	Mali x +

SANGARE Tiemoro Souleymane	Chef de projet	Mali .
SISSOKO Cheick Oumar	Etudiant ENI	Mali x +
SEINI Djibo	Technicien géophysicien	Niger +
SYLLA Mamadou	Hydrogéologue	Mali x +
THIERRO Bourema	Hydrogéologue	Mali .
TRAORE Karaba	Hydrogéologue	Mali . x +
TOUNKARA Fanta Mady	Hydrogéologue	Mali x +

BAGLIONI Marco Ingénieur Italien Projet Italien au Mali x

SIBAUD Claude A.F.V.P. Projet au Burkina Faso x +

. Ont suivi le cours en 1985

x Ont suivi le cours en 1986

+ Ont suivi le cours en 1987

COMMUNICATION 8

TITRE : L'INSTITUT GEOGRAPHIQUE DU BURKINA  
ACTIVITES ET PERSPECTIVES

AUTEUR : IGB  
OUAGADOUGOU.

## I/APERCU

La nécessité de disposer d'un service cartographique est apparue très tôt au BURKINA FASO. C'est ainsi qu'à partir d'une section plutôt modeste rattachée au Service Topographique National, les autorités ont décidé la création d'un véritable service national chargé de la cartographie.

Plusieurs raisons expliquent cette attitude mais les plus pertinentes sont d'une part, l'insuffisance et l'inadaptation des documents cartographiques existants, produits exclusivement par l'ex-puissance colonisatrice et d'autre part la mise en chantier de nombreux projets dont l'identification et la bonne exécution nécessitaient l'utilisation des cartes appropriées.

L'IGB qui va célébrer cette année le douzième anniversaire de sa création est un service relativement jeune, surtout quand on s'avise à le comparer à des instituts prestigieux tels que l'IGN/France qui a derrière lui plusieurs décennies d'expérience. Cependant, la motivation réelle qui a conduit à sa création et surtout la détermination et la foi qui animent ses acteurs d'aujourd'hui en font un service dynamique, en mesure de réaliser les principaux documents cartographiques, topographiques et photogramétriques dont un pays comme le BURKINA, et donc pensons nous la plupart des pays membres du C.I.E.H. peuvent avoir besoin dans le cadre de leurs activités de développement. C'est pourquoi l'IGB qui a été invité à prendre part à ces journées scientifiques où sont réunis des frères et confrères des pays amis membres du CIEH salue cette initiative et félicite sincèrement les promoteurs et les organisateurs.

## II/LES ACTIVITES DE L'IGB

### 1°) Les prises de vues aériennes

L'IGB dispose d'un avion photographe équipé d'une Caméra à deux chambres permettant de réaliser toutes les prises de vues aux échelles courantes. Les films sont traités sur place dans nos laboratoires qui ont acquis récemment les équipements les plus performants en la matière. En neuf ans d'activités l'équipage a effectué plus de cent (100) missions pour le compte des clients privés ou des administrations publiques aussi bien au Burkina Faso qu'à l'étranger.

La mise en oeuvre de nouvelles techniques aérospatiales n'a pas entamé le rôle irremplaçable de la photographie aérienne qui demeure un instrument aux multiples usages aussi bien pour les professionnels que pour les profanes.

### 2°) Les services de cartographie

Une utilisation courante de ces photographies aériennes faite par l'IGB est la confection de documents cartographiques pour lesquels nous disposons d'équipements appropriés de terrain et de laboratoire.

Dans ce cadre, l'IGB a reçu commande et exécuté divers cartes et plans pour des clients très variés ; Au nombre de ceux-ci, il y a l'administration publique Burkinabè qui a comandé la couverture cartographique de 40.000 Km<sup>2</sup> à l'échelle de 1/50.000e.

### 3°) Perspectives d'avenir

Elles se résument aujourd'hui en la volonté de l'IGB d'accroître et de diversifier ses activités en direction de ses partenaires et des utilisateurs de ses services. La section informatique dont le noyau est déjà en place sera pleinement opérationnelle à la fin de cette année.

A l'occasion de cet atelier, l'IGB voudrait assurer le CIEH et tous les pays qui le composent de sa disponibilité dans l'accomplissement de la mission qui est la leur. Il est à nos yeux un exemple de coopération dynamique entre pays africains si proches et si loin les uns des autres.

COMMUNICATION N° 9

TITRE : APPLICATIONS DE LA TELEDETECTION POUR  
L'EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU  
SOUTERRAINE EN AFRIQUE.

AUTEUR : J. PARNOT  
CRTO

## INTRODUCTION

Le présent article a pour objet de donner un aperçu sur les applications pratiques de la télédétection en hydrogéologie, telles qu'elles peuvent être mises en oeuvre en Afrique.

Les informations fournies résultent essentiellement de l'expérience du Centre Régional de Télédétection (CRTO) dans ce domaine et sont donc forcément incomplètes et plus particulièrement orientées sur les utilisations à partir de techniques et de moyens relativement peu sophistiqués et donc plus faciles à mettre en oeuvre dans les conditions qui prévalent en Afrique.

La première partie est consacrée à des rappels sur les notions de base en télédétection et sur les données actuellement disponibles.

La deuxième partie présente les différentes applications possibles en hydrogéologie en indiquant les données et les moyens nécessaires ainsi que les méthodes utilisables.

La troisième partie fournit des exemples d'application en Afrique.

### 1 - ASPECTS GENERAUX DE LA TELEDETECTION

#### 1.1 - Principes généraux

La télédétection regroupe l'ensemble des techniques permettant de mesurer l'énergie lumineuse (rayonnement) émise ou réfléchi par les objets à la surface de la terre.

Le comportement des objets par rapport au rayonnement incident (soleil, onde radar incidente ...) varie en fonction de leur nature, rugosité, température, humidité, etc..., ce qui permet de les différencier à partir d'une mesure directe ou indirecte de l'énergie reçue par un capteur dans une ou des bandes spectrales données.

Les capteurs communément employés en télédétection sont :

- les émulsions photographiques (panchromatique ou infra-rouge noir et blanc, couleurs naturelles, infra-rouge couleur) ;
- les radiomètres transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique, sensibles dans une (radiomètre monospectral) ou plusieurs (r. multispectral) bandes spectrales. En télédétection, on utilise des radiomètres à balayage (ou scanner) multispectraux comportant 2 à plus de 10 canaux dans le visible, le proche-infra-rouge, l'infra-rouge thermique réfléchi et l'infra-rouge thermique émis (IR Lointain) ;
- les radars sensibles aux micro-ondes (hyperfréquences) naturellement émises (radars passifs) ou réfléchies à partir des ondes émises par le radar (radar actif).



Les données ainsi acquises se présentent sous forme analogique ou sont immédiatement transformées en données numériques (radiomètres, radars). Cette dernière technique est la règle à bord des satellites, les données numériques étant aisément transmissibles aux stations de réception sur terre.

Les stations de pétraitement et de traitement permettent ensuite de disposer de produits utilisables sous forme de restitutions photographiques ou de bandes compatibles avec les ordinateurs (systèmes de traitement numérique des images).

L'interprétation des données de télédétection peut donc être effectuée de façon purement visuelle (photointerprétation) ou avec l'assistance d'un ordinateur qui permet d'obtenir des produits intermédiaires plus ou moins élaborés, allant jusqu'à l'établissement de pseudo-cartes.

Traitements et interprétations peuvent être plus ou moins complexes selon les données utilisées et les méthodologies développées. Différents types d'études peuvent être conduites :

- Etudes diachroniques ou comparatives à partir de données acquises à des dates différentes ;
- Etudes pluriniveaux à partir de données différentes (par exemple images satellites et photographies aériennes) ;
- Etudes intégrées en associant données de télédétection et autres types de données (mesures, observations de terrain...).

D'une manière générale, la télédétection n'est pas une discipline isolée mise en oeuvre par des télédétecteurs confinés dans leur spécialité. Bien au contraire, dans le cas de la télédétection appliquée, elle nécessite une connaissance approfondie de la discipline traitée et devra être confrontée à la réalité terrain.

## 1.2 - Disponibilité des données en Afrique

Les photographies aériennes sont généralement disponibles auprès des Services Géographiques nationaux. Certains pays disposent de moyens de prise de vue. Dans d'autres cas la réalisation de nouvelles prises de vue nécessite l'intervention d'organismes étrangers.

Les images satellite peuvent être commandées auprès des principaux distributeurs :

- EOSAT (Etats-Unis) pour les images Landsat 1, 2 et 3 (radiomètre MSS) et les images Landsat 4 et 5 (radiomètres MSS et TM) ;
- EURIMAGE (Agence Spatiale Européenne Italie) pour les images acquises par la Station de Mas Palomas (Canaries) : données Landsat MSS (depuis Juin 1985), données Landsat TM et NOAA-AVHRR (depuis Mai 1987) ;
- SPOT IMAGE (France) pour les données SPOT 1 (depuis Mars 1986).

.../...

Le Centre Régional de Télédétection (CRTO, Ouagadougou) peut également fournir des données à partir des images archivées ou en effectuant des traitements après commande auprès des distributeurs. Des études sont en cours pour l'installation d'une station SPOT et/ou LANDSAT.

Le Centre AGRHYMET (Niamey) va être doté d'une station NOAA-AVHRR en 1988.

La Station de Mas Palomas devrait être complétée par un module de réception des images SPOT.

Outre les données Landsat, Spot et NOAA, il existe également d'autres types de données utilisables en télédétection, en particulier :

- les images METEOSAT,

- diverses données acquises dans le cadre de missions de la navette spatiale américaine :

- . images radar A et SIR B,
- . photographies spatiales Caméra Métrique et Large Format Caméra,
- . images multispectrales MOMS 01.

Ces données couvrent certaines zones d'Afrique le long de traces d'orbite déterminées.

- les photographies et images multispectrales acquises par le satellite COSMOS (URSS) dont la commercialisation est en cours.

Les développements récents des programmes spatiaux et des infrastructures au sol permettent de proposer une vaste gamme de produits allant des images à très faible résolution, couvrant tout le continent Africain (Météosat) à des images de haute résolution couvrant des aires géographiques limitées (SPOT et COSMOS). Certaines images permettent de disposer de la vision stéréoscopique (SPOT), d'autres proposent des canaux infrarouge thermique (Landsat TM, NOAA-AVHRR, Météosat), ou encore une résolution radiométrique très fine (NOAA-AVHRR).

Ceci permet de disposer de données pour des études variées dans une vaste gamme d'échelle (1:5.000.000 à 1:20.000), permettant de couvrir plusieurs pays ou une seule petite région.

En contrepartie cela demande une connaissance approfondie des produits et des procédures d'acquisition.

.../...

## 2 - POSSIBILITES D'APPLICATIONS DE LA TELEDETECTION EN HYDRO- GEOLOGIE

### 2.1 - Principaux domaines d'application

Trois domaines principaux concernent la télédétection :

- la détermination des régimes hydrogéologiques,
- la mise en évidence des aquifères superficiels,
- la recherche des eaux souterraines.

#### 2.1.1 - Détermination des régimes hydrogéologiques

La télédétection permet de fournir des données sur les aspects suivants :

- Formations géologiques : détermination de la nature du substrat (composition lithologique, porosité ...) permettant d'apprécier les possibilités de stockage et de circulation des eaux ;
- Formations superficielles : appréciation de leur nature, de leur épaisseur et du comportement hydrique permettant d'en déduire les possibilités d'infiltration et de stockage (aquifères alluviaux, altérites ...)
- Structures géologiques : analyse géostructurale en vue de déterminer les possibilités d'infiltration localisée (eau de surface) et de circulation profonde (eau souterraine).

En région de socle et dans le cas des formations sédimentaires compactes (grès ...) la ressource hydrogéologique est essentiellement liée à la fracturation.

Les photographies aériennes permettent de détecter les réseaux faillés (photofractures) et d'en effectuer une localisation précise.

Les images satellite se prêtent plus particulièrement à l'analyse régionale. La vision synoptique permet plus aisément de détecter les accidents principaux et d'en déduire l'organisation générale en relation avec la tectonique.

La télédétection concerne plus particulièrement l'étude des réseaux hydrographiques et l'inventaire des linéaments (images satellite) et des photofractures (photographies aériennes).

A partir de là il est possible de dresser des cartes hydrogéologiques, en s'appuyant sur les données disponibles (forages, sondages géologiques ...).

## 2.1.2 - Mise en évidence des aquifères superficiels

La télédétection permet d'observer indirectement la présence de ces aquifères, en particulier :

- Observations hydrologiques : l'alimentation des nappes superficielles est essentiellement liée au régime hydrologique. Du fait de leur répétitivité, les images satellite permettent d'observer l'évolution des zones alluviales et des zones d'épandage des crues ;
- Observations hydrogéologiques : les substrats compacts, peu faillés et imperméables limitent les percolations profondes et favorisent le stockage à faible profondeur, dans les zones dépressionnaires occupées par des matériaux poreux ;
- Observations des formations superficielles : celles-ci assurent le stockage des eaux superficielles et il est donc important de les localiser et d'en déterminer la nature et le comportement hydrique (alluvions, colluvions, altérites, formations dunaires...) ;
- Autres observations : celles-ci peuvent concerner la pédologie, la géomorphologie, la nature et la densité du couvert végétal. Elles permettent d'évaluer certains paramètres concernant le régime hydrogéologique superficiel.

Ces différentes observations peuvent être effectuées à l'aide des méthodes déjà citées (analyse des réseaux hydrographiques, inventaires des linéaments et des photofractures), par des interprétations thématiques classiques (végétation, sols...) et par l'utilisation de techniques particulières par exemple :

- Thermographie : corrélations entre valeurs radiométriques dans l'infra-rouge thermique et mesures hydriques (humidité des sols, piézométrie, évapotranspiration...) ;
- Enregistrements radar : pénétration des ondes dans les couches poreuses sèches (sables dunaires ...) permettant de détecter la morphologie souterraine (vallées fossiles en zone désertique par exemple).

Certaines observations s'appuient sur les données multispectrales mais il est généralement nécessaire de compléter les études par l'analyse de couples stéréoscopiques de photographies aériennes, permettant de mieux percevoir la nature des matériaux et la géomorphologie.

Ces études permettent de dresser des cartes d'inventaires des ressources en eau peu profonde, complétant éventuellement les cartes d'inventaire en eau souterraine établies dans le cadre des précédentes investigations (cf. 2.1.1). Là aussi, il sera nécessaire d'intégrer les données disponibles (puits).

### 2.1.3 - Recherche d'eau souterraine

Celle-ci concerne généralement des zones circonscrites dans le cadre d'opérations hydraulique urbaine, villageoise, agricole ou pastorale. Elle nécessite cependant une bonne connaissance des régimes hydrogéologiques régionaux.

Certaines régions se prêtent plutôt à l'implantation de puits (zones alluviales, zones d'altération continue ...), d'autres à celle de forages (zones résiduelles sur substrat faillé ou roches métamorphiques), d'autres enfin présentent les deux possibilités. La connaissance de ces régions devra donc guider les investigations et l'utilisation des données de télédétection.

La recherche de sites de forage en zone faillée (aquifères discontinus) repose essentiellement sur une analyse géostructurale complétée par des observations sur la nature des matériaux (roches, altérites ...) et sur la géomorphologie. L'étude des linéaments sur l'image satellite pourra être complétée par l'interprétation stéréoscopique des photographies aériennes.

La recherche de sites de puits repose essentiellement sur une étude des formations superficielles et de leur environnement. L'essentiel des informations nécessaires est tiré de l'interprétation des photographies aériennes. Cependant certains paramètres (humidité des sols, régime hydrologique...) pourront être acquis à l'aide des images satellite.

Parallèlement l'étude des documents de télédétection permet également de réaliser les études préalables à l'implantation de sites de barrages souterrains, celles-ci nécessitent la caractérisation des zones alluviales et une analyse géomorphologique du profil des vallées.

### 2.2 - Techniques de traitement et d'interprétation

Les études régionales reposent généralement sur l'utilisation des images satellite à faible résolution, mais couvrant de vastes zones : Landsat MSS ou NOAA-AVHRR.

Les images satellite à moyenne ou haute résolution spatiale (Landsat TM, SPOT, COSMOS ...) se prêtent à des études plus détaillées à l'intérieur des régions, tout en conservant les avantages inhérents aux images satellite : vision synoptique, répétitivité, analyse multispectrale, traitements numériques spécifiques...

Les photographies aériennes permettent d'affiner les observations des images satellite grâce à leur meilleure résolution spatiale (identification des objets, localisation précise dans le paysage) et à la vision du relief (analyse géomorphologique, observation des structures géologiques). Par contre elles se présentent le plus souvent sous forme de tirages panchromatiques ce qui rend difficile l'appréciation de certains phénomènes (humidité, température ...).

Les émulsions photographiques et les enregistrements radiométriques sont plus adaptés à l'interprétation des paramètres ou concepts analysés dans le cadre des études hydrogéologiques. Les appréciations suivantes peuvent être indiquées en vue du choix de la donnée la plus adéquate pour le problème posé.

### 2.2.1 - Etude des structures géologiques

Bonne différenciation à partir des canaux rouge/infra-rouge, proche infra-rouge ou infra-rouge thermique. On peut également utiliser des combinaisons colorées de ces canaux : composition colorée classique type IRC, (infra-rouge couleur), image thermique fausse couleur (température de surface) ou images ratio.

Les photographies aériennes infra-rouge noir et blanc (IR) ou infra-rouge couleur (IRC) se prêtent le mieux à cette analyse. Toutefois les photographies panchromatiques noir et blanc permettent d'apprécier assez aisément les structures géologiques grâce à la vision stéréoscopique.

Les traitements numériques permettent de réaliser aisément toutes les combinaisons entre canaux (compositions colorées, températures de surface, ratios) en optimisant le contraste et le rendu des couleurs (amélioration dynamique, partition des teintes au choix de l'opérateur). Il est également possible de réaliser des filtrages en vue de mettre en évidence certaines orientations particulières (direction tectonique, par exemple).

En dehors de ces aspects techniques, l'interprétation des structures géologiques est surtout affaire d'expérience et repose souvent sur le raisonnement et les dons d'observation. Ainsi, la mise en évidence des linéaments repose sur des observations variées sur le milieu : végétation, réseau hydrographique, discontinuité lithologique ou accidents géomorphologiques.

### 2.2.2 - Mise en évidence des formations géologiques

Bonne différenciation à partir du canal rouge et assez bonne différenciation à partir du canal panchromatique ou des émulsions photographiques panchromatiques. Les enregistrements thermiques permettent également de distinguer certaines formations intrusives (filons, dykes).

La différenciation entre alluvions et roches est de préférence obtenue à partir des canaux proche infra-rouge et infra-rouge thermique (différences d'humidité ou de température). De même les enregistrements radar permettent de traiter ce thème (différence d'humidité).

Les roches ignées seront plutôt interprétées à partir des canaux rouge/infra-rouge ou proche infra-rouge ou, de préférence, sur des compositions colorées de type IRC.

.../...

Les aspects texturaux et structuraux des images ou des photographies aériennes sont également à prendre en compte. Certaines roches ont un aspect uniforme (roches sédimentaires, argilites...) d'autres un aspect finement granuleux (gneiss, granites) ou plus grossier (dolérites, gabbros). Les schistes sont reconnaissables à leur structure orientée.

L'observation du couvert végétal fournit également des informations sur la nature et les propriétés des formations géologiques, en particulier en ce qui concerne leur comportement hydrique.

Les traitements numériques peuvent concerner l'amélioration des images (rehaussement du contraste, compositions colorées), la création d'images composites (équidensités colorées, images ratio) ou des traitements plus élaborés de type classification (états de surface, classification lithologique). Ils constituent une aide à l'interprétation sans toutefois permettre d'automatiser entièrement la cartographie.

### 2.2.3 - Mise en évidence des formations superficielles

Panchromatique : géomorphologie, turbidité des eaux,

Canal orangé/rouge : pédologie, géomorphologie, humidité des sols,

Canal rouge/infra-rouge : pédologie, zones humides, inondables et marécages,

Canal proche infra-rouge : eau libre, zones humides, marécages, pédologie, zones dénudées,

Canal thermique : zones humides ou inondables, humidité des sols,

Radars : eau libre, marécages et zones humides, détection sous matériaux poreux secs (sable).

Les images colorées (compositions colorées, photographies IRC) permettent de traiter plus facilement ces thèmes en particulier pour distinguer les différents états d'humidité dans les vallées et zones inondables (différenciation eau libre, sols vaseux, marécages, sols humides et zones exondées).

La nature des formations pourra être plus ou moins facilement déterminée à partir de la texture des images, de la végétation, de la situation topographique. L'étude du régime hydrique nécessite de traiter des données acquises à une date optimale ou, si possible à différentes dates.

Les traitements numériques sont du même type que ceux décrits précédemment (formations géologiques) et pourront donc être combinés pour les deux thèmes.

## 3 - EXEMPLES D'APPLICATIONS EN AFRIQUE

Les exemples qui suivent présentent quelques cas concrets d'application de la télédétection aux études hydrologiques en Afrique.

Une fiche récapitule dans chaque cas les objectifs, la méthode et les résultats obtenus.

Cinq exemples concernent des études de reconnaissance avec établissement de cartes de synthèse hydrogéologique.

Le dernier exemple concerne la recherche d'eau souterraine (localisation de sites de forages).

### 3.1 - Reconnaissance géostructurale du Bassin Sénégalais

#### Présentation - Objectifs

Etude réalisée par la Direction des Etudes Hydrauliques (Dakar, Sénégal) en vue d'améliorer la connaissance de la configuration des aquifères souterrains du bassin sédimentaire du Sénégal.

La télédétection spatiale a été utilisée pour mettre en évidence les structures géologiques et en particulier, la fracturation.

#### Méthode

Interprétation visuelle des images Landsat (1:1.000.000 et 1:500.000, noir et blanc et compositions colorées) avec établissement de la carte régionale des linéaments.

Comparaison de la carte des linéaments à la carte des isohypses (toit de l'aquifère) avec analyse géostructurale selon un modèle de tectonique cassante.

#### Résultats

Cartographie à 1:200.000 sur le bassin sud-Sénégalais avec la série des trois cartes :

- Carte initiale des isohypse, d'après les données hydrogéologique (forages...);
- Carte des linéaments (interprétation Landsat) ;
- Carte de synthèse hydrogéologique (isohypses modifiés).

Cette étude fournit un intéressant exemple d'utilisation de la télédétection pour l'établissement des cartes hydrogéologiques de reconnaissance en milieu fissuré.

#### Commentaires

La vision synoptique des images satellite permet de traiter rapidement et à peu de frais de vastes zones. La mise en évidence des structures régionales n'a pas posé de problème que ce soit sur le socle ou sur les formations sédimentaires sablo-argileuses du Continental Terminal.

Une telle méthode est donc applicable en de nombreuses régions d'Afrique de l'Ouest.

### 3.2. - Recherche hydro-géologique en Mauritanie

#### Présentation - Objectifs

Etude réalisée par le PNUD en vue de développer une méthodologie pour l'établissement des cartes de reconnaissance hydrologiques préalables à la recherche d'eau souterraine.



#### Méthode

Photointerprétation préliminaire du milieu physique (géologie structurale, géomorphologie, formation superficielle) en vue de la délimitation des secteurs hydrogéologiques favorables.

Préparation des reconnaissances hydrogéologiques à l'aide de la photointerprétation : localisation des sites, choix de zones tests (études détaillées).

Les travaux de photointerprétation sont donc suivis d'investigations classiques sur le terrain : reconnaissance géologique, essais de forages, mesures de la qualité des eaux ...

#### Résultats

Carte de reconnaissance hydrogéologique avec délimitation des secteurs hydrogéologiques et localisation des zones tests.

#### Commentaires

Il est possible que l'utilisation d'images satellite aurait été mieux adaptée à ce type d'étude, en réservant l'utilisation des photographies aériennes à l'étude des zones tests.

### 3.3 - Etude hydrogéologique régionale (Niger)

Etude réalisée par l'Institut Fédéral pour les Sciences de la Terre et les Ressources Nationales (RFA).

L'objectif était d'évaluer les ressources hydrogéologiques en relation avec la géologie et les formations superficielles.

#### Méthode

Interprétation multidates des images Landsat MSS avec détermination des capacités de stockage dans les dunes et interprétation linéamentaire en région de socle pour la recherche des aquifères profonds localisés.

#### Résultats

Carte de reconnaissance à 1:1.000.000 avec inventaire des sites d'aquifères sous-dunaires.

Carte de synthèse hydrogéologique (aquifères profonds et superficiels) avec délimitation des sites potentiels pour investigations complémentaires (études géophysiques et sondages tests).

#### Commentaires

Cette étude montre une utilisation des images Landsat appliquée à la recherche d'eau souterraine (analyse linéamentaire géostructurale) complétée par celle des aquifères superficiels en région dunaire. Ce type d'application paraît envisageable dans de nombreuses régions sahéliennes.

### 3.4 - Carte hydromorphologique régionale (Mali)

#### Présentation - Objectifs

Etude réalisée par l'Université Louis Pasteur de Strasbourg (Professeur J. TRICART) dans le cadre d'une étude générale (Etude écologique des pays tropicaux).

L'objectif était d'étudier les possibilités d'utilisation de l'imagerie satellite pour l'analyse du paysage, dont celle des régimes hydrologiques et hydrogéologiques.

#### Méthode

Interprétation visuelle d'une image Landsat acquise après la première période de sécheresse au Sahel (Janvier 1974), sous forme de tirages noir et blanc et de composition colorée (zone lacustre au Mali).

Zonage en fonction des régimes hydrologiques et hydrogéologiques. Pour ces derniers ont été distinguées :

- . Les zones d'infiltration généralisée,
- . Les zones d'infiltration diaclasique,
- . Les zones dépourvues d'aquifère profond (barrière hydrogéologique).

#### Résultats

Carte hydromorphologique à 1:1.000.000.

#### Commentaires

Cette étude montre un exemple d'intégration de données diverses sur le milieu (pédologie, géomorphologie structurale, tectonique régionale, végétation...), acquises à partir de l'imagerie satellite permettant de déterminer les régimes hydriques (inondation, infiltration, circulation des eaux, alimentation des nappes et des aquifères).

Ce type d'approche paraît particulièrement bien adapté à l'étude des bassins des grands fleuves et dans les zones deltaïques.

### 3.5 - Carte de synthèse des potentialités en relation avec les ressources en eau souterraine

#### Présentation - Objectifs

Etude réalisée par l'Office Fédéral des Géosciences et des Ressources Minérales (RFA) sur l'ensemble du Burkina.

L'objectif était de fournir des données de base multidisciplinaires (géologie, hydrogéologie, pédologie et utilisation de l'espace) avec établissement d'une série de cartes à 1:1.000.000.

#### Méthode

Interprétation des images Landsat appuyée sur les données thématiques existantes et complétée par des contrôles de terrain sur des "secteurs-types".

Cartographie (7 types de cartes) dont la synthèse des potentialités combinant trois types de données :

- La ressource hydrogéologique, d'après l'interprétation géostructurale (densité de fracturation et géologie) ;
- L'aptitude des sols, d'après la carte pédologique ;
- La densité de la population, exprimant les besoins en eau.

#### Résultats

Carte de synthèse à 1:1.000.000 sur l'ensemble du Burkina.

#### Commentaires

L'établissement de ce type de carte permet de disposer d'un document de planification au niveau national. Les données de base nécessaires sont mises en forme à l'aide des images satellite, celle-ci constituant un outil précieux pour la synthèse cartographique à petite échelle. Il s'agit d'un exemple type d'intégration de données d'origines diverses (cartes thématiques, interprétation des images, données de terrain).

### 3.6 - Etude hydrogéologique de Sanwara (Burkina)

#### Présentation - Objectifs

Etude réalisée par le CRTO dans la région de Sanwara-Gaoua, avec pour objectif d'évaluer les ressources en eau souterraine et d'en déduire l'implantation de sites potentiels de forages ou de puits.

#### Méthode

Interprétation d'image Landsat (composition colorée à 1:50.000) avec mise en évidence des linéaments et évaluation des régimes hydriques.

Interprétation des photographies aériennes à 1:50.000 avec détermination des photofractures, de la géomorphologie et localisation des sites potentiels.

#### Résultats

Carte géomorphologique et physiographique à 1:500.000,

Carte géostructurale à 1:500.000,

Carte géologique à 1:500.000,

Carte des sites potentiels à 1:50.000.

#### Commentaires

La méthodologie employée repose sur une approche classique dans le cas de la recherche d'aquifères localisés en milieu fissuré, où la ressource est liée à la présence d'altérites ou de fractures ouvertes.

L'image satellite permet une approche régionale conduisant à la localisation approximative des secteurs potentiels (fractures ouvertes, neuds de fractures, zones d'altérites et formations superficielles productrices). L'analyse plus détaillée effectuée sur les photographies aériennes permet ensuite de localiser les sites en fonction des paramètres hydrogéologiques.

Les sites potentiels peuvent enfin être classés en fonction de critères complémentaires (proximité des villages, accessibilité ...).

## CONCLUSION

Les développements récents de la télédétection permettent d'envisager une utilisation croissante de cette technique pour l'évaluation des ressources hydrogéologiques et la recherche des sites d'implantation des ouvrages de captage.

Ces progrès concernent aussi bien les performances des nouveaux satellites (résolution spatiale, gamme et résolution radiométrique, stéréoscopie...), que la disponibilité des données (stations de réception et systèmes de transmission) ou les moyens de traitement (matériels et logiciels informatiques).

La télédétection permet en particulier de traiter la plupart des problèmes de cartographie depuis les plus petites échelles (images satellite à faible résolution et grand champ d'observation) jusqu'aux très grandes échelles (photographies aériennes).

L'interprétation visuelle des données permet de traiter la plupart des thèmes intéressant l'hydrogéologue. Celle-ci peut s'appuyer sur des traitements numériques spécifiques qui fournissent des documents intermédiaires d'aide à l'interprétation et à la cartographie.

Dans tous les cas, il est nécessaire de disposer d'un référentiel sur la région concernée et d'une bonne connaissance du milieu concerné.

Les différents cas présentés montrent que l'étude des ressources en eau souterraine à partir des données de télédétection nécessite l'analyse de nombreux facteurs du milieu physique ou même humain. Il s'agit donc souvent d'une approche pluridisciplinaire.

En outre, les données de télédétection permettent d'aborder les problèmes à différents niveaux et/ou à différentes périodes (études stratifiées et/ou évolutives).

D'autres nouvelles techniques peuvent être associées à la télédétection (informatique, infographie, télétransmission...) en vue du traitement de l'ensemble des informations.

A cet égard, la télédétection constitue un volet de la chaîne de traitement des données des systèmes d'informations géographiques dont les développements attendus au cours des prochaines années devraient permettre des progrès sensibles dans la gestion et le suivi des ressources.

COMMUNICATION 10

TITRE : INTERPRETATION DES IMAGES SATELLITAIRES SPOT  
ET CARTOGRAPHIE DES APTITUDES AU RUISELLEMENT  
ET A L'INFILTRATION DES SOLS SUR UN BASSIN  
VERSANT SAHELIEU : LE BASSIN VERSANT DE LA MARE  
D'OURSU - BURKINA FASO.

AUTEUR : J.M. LAMACHERE  
ORSTOM, BURKINA FASO

INTERPRETATION DES IMAGES SATELLITAIRES SPOT ET CARTOGRAPHIE DES APTITUDES AU RUISSELLEMENT ET A L'INFILTRATION DES SOLS SUR UN BASSIN VERSANT SAHELIEN : LE BASSIN VERSANT DE LA MARE D'OURSIS - BURKINA FASO

J.M. LAMACHERE

Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération - ORSTOM BP 182 - Ouagadougou, Burkina

RESUME

Le mini-simulateur de pluies a permis de développer en Afrique de l'Ouest, depuis une dizaine d'années, des mesures de ruissellement sur un grand nombre de sols aux états de surface variés, dans des conditions expérimentales parfaitement maîtrisées.

Utilisant les résultats de ces mesures en zones sahélienne, une méthode d'observation des états de surface est ici associée à l'interprétation des images satellitaires SPOT afin de cartographier les aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols du bassin versant de la mare d'Oursi.

SUMMARY

Streamflow measurements by means of the rainfall simulator have been significantly developed in West Africa for the last ten years on lots of soils differently covered by vegetation and mineral elements.

Using those results in sahelian belt, a method for observing the covers of the soils has been combined with a visual and a numerical interpretation of remote sensing data through SPOT pictures to map the aptitude of the soils for the streamflow and the infiltration in the catchment of the pond of Oursi, in Northern Burkina Faso.

INTRODUCTION

Les mesures de ruissellement au simulateur de pluies sur des surfaces au sol de un mètre carré, effectuées au nord du Burkina (CHEVALIER - 1982; ALBERGEL - 1987), ont servi à définir des relations hydrodynamiques primaires valables pour différents types d'états de surface de la région d'Oursi. A l'échelle d'une surface de taille limitée, un versant ou un petit bassin versant, la connaissance de la répartition spatiale des états de surface a conduit plusieurs chercheurs à formuler des relations hydrodynamiques, combinaisons linéaires des précédentes, où chaque relation primaire est pondérée par un coefficient fonction de la superficie occupée sur le versant ou le bassin versant par l'état de surface qui lui est associé.

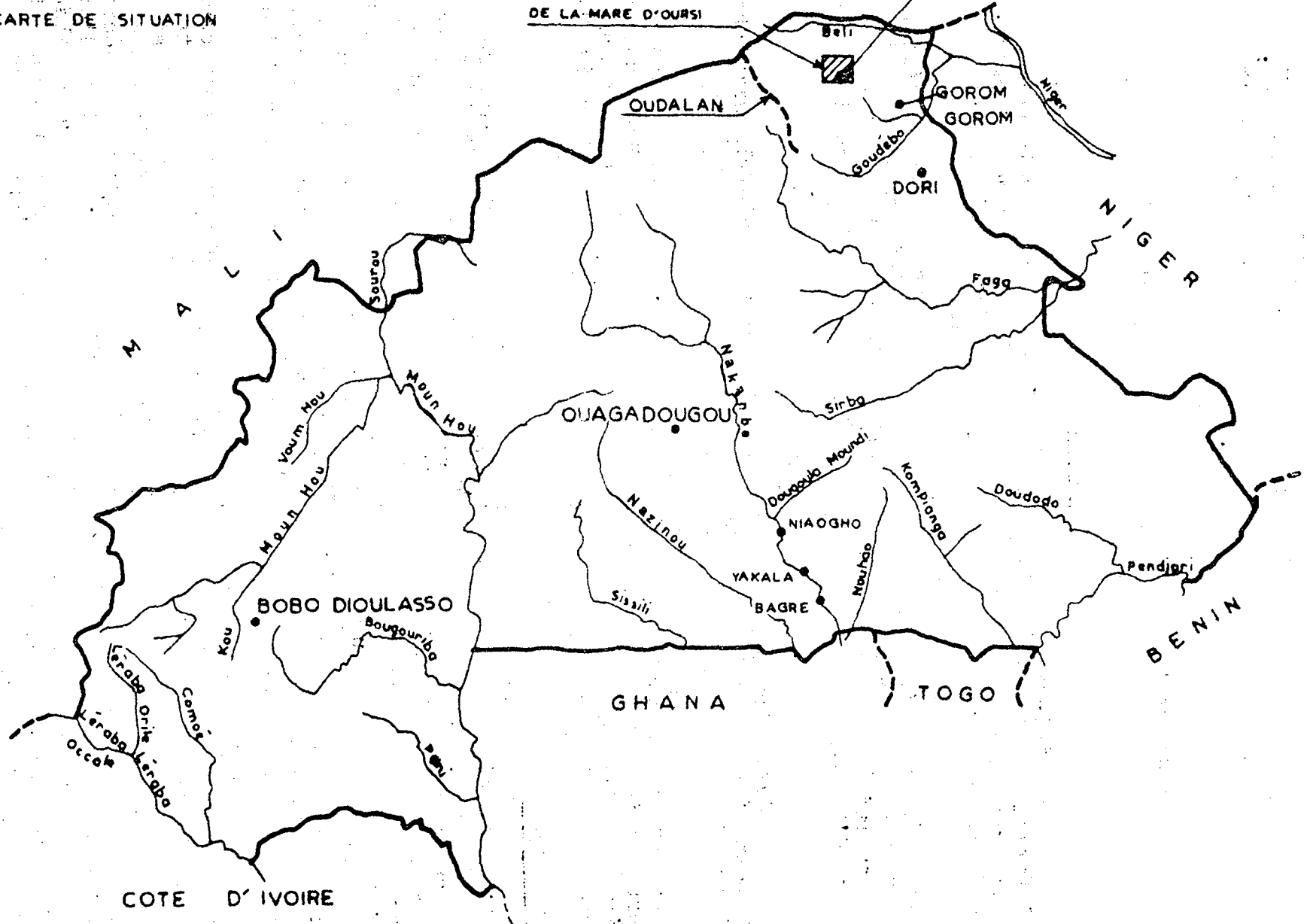
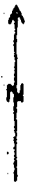
L'originalité de la méthode que nous allons développer consiste à perfectionner la description de la répartition spatiale des états de surface par une analyse visuelle et numérique des images satellitaires SPOT. Cette analyse permet l'identification de zones radiométriquement homogènes dont la répartition spatiale des états de surface est décrite au sol par des transects ou lignes d'observation. A chaque ligne d'observation on associe une relation hydrodynamique que l'on admet valable sur l'ensemble des surfaces de même composition radiométrique. On définit ainsi des zones hydrologiquement homogènes dont l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration est caractérisée de manière identique sur toute une zone par une relation mathématique qui joue ici le rôle d'une fonction de production des eaux de ruissellement et d'infiltration.

**BURKINA FASO**  
CARTE DE SITUATION

Fig. 1

BASSIN VERSANT  
DE LA MARE D'OURS

STATION CLIMATOLOGIQUE  
DE JALAFANKA



Echelle: 1/4000000



Il est alors possible de dresser une carte régionale d'aptitude des sols au ruissellement et à l'infiltration, production qui constitue la première phase d'une modélisation des ruissellements à l'échelle des bassins versants.

## 1. - LES ETATS DE SURFACE DE LA REGION D'OURSI

### 1.1- Description

La description des états de surface de la région d'Oursi a été effectuée avec la collaboration de J.L. JANEAU, pédologue au centre ORSTOM d'Adiopodoumé en Côte d'Ivoire, selon une méthodologie mise au point par C. VALENTIN. La description de la surface du sol, limitée aux surfaces élémentaires, s'effectue sur les éléments suivants :

- le couvert minéral : nature et répartition,
- le micro-relief : forme et amplitude,
- le couvert végétal : nature et répartition,
- l'activité faunique : nature, forme et répartition,
- l'activité hydrique ou éolienne : traces de ruissellement ou de déflation.

Elle se poursuit par la description d'un micro-profil de quelques centimètres d'épaisseur où les matériaux pédologiques présentent généralement des différenciations verticales assez nettes.

Vingt-quatre types d'états de surface ont ainsi été décrits dans la région d'Oursi. Ils sont classés sur la liste ci-dessous selon la taille dominante de leurs éléments les plus apparents à la surface du sol.

#### Surfaces à éléments grossiers

Surfaces couvertes à plus de 40 % d'éléments dont la taille est supérieure à 2 millimètres

- type 10 affleurement rocheux, granite ou latérite
- type 11 surface à éléments grossiers ferrugineux, produits du démantèlement d'une cuirasse latéritique
- type 12 surface à éléments grossiers granitiques
- type 13 surface à épandage gravillonnaire

#### Surface à sables grossiers

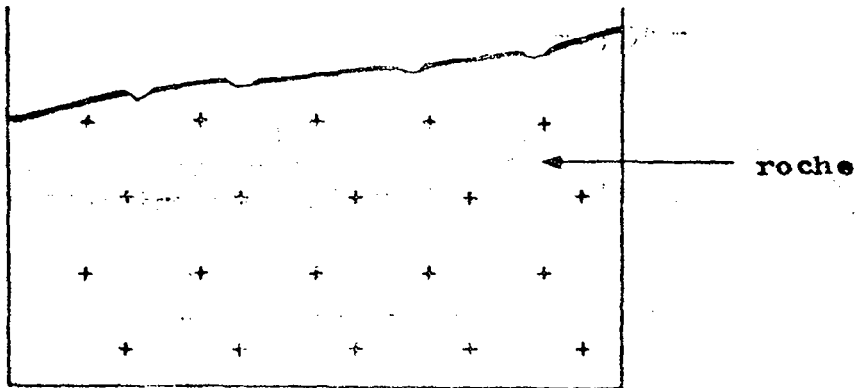
Surfaces couvertes à plus de 40 % d'éléments dont la taille est inférieure à 2 millimètres et supérieure à 0,2 millimètre

- type 20 sables grossiers ferrugineux
- type 21 sables grossiers d'origine granitique

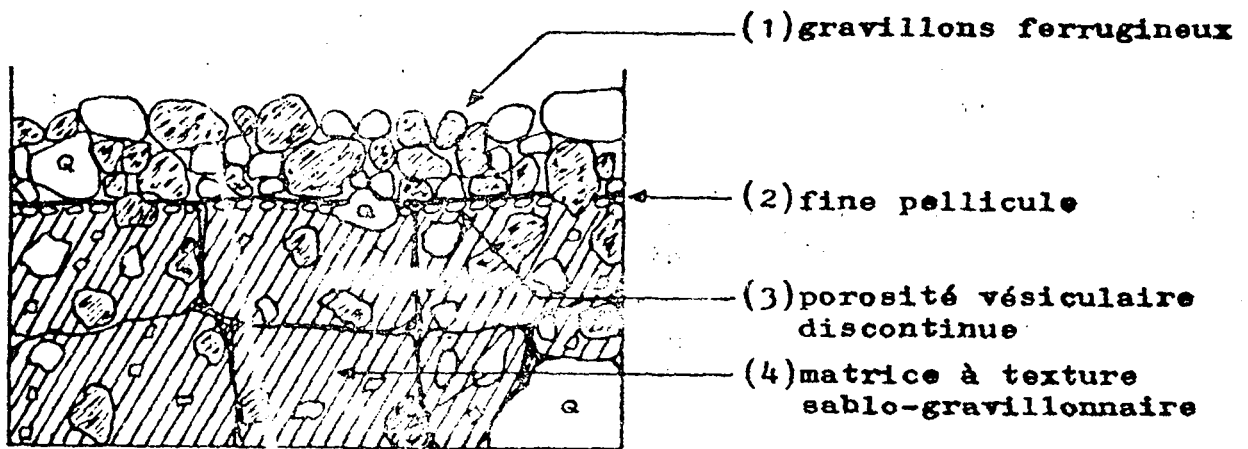
#### Surface à sables fins et moyens

Surfaces couvertes à plus de 40 % d'éléments dont la taille est inférieure à 0,2 millimètre et supérieure à 0,05 millimètre

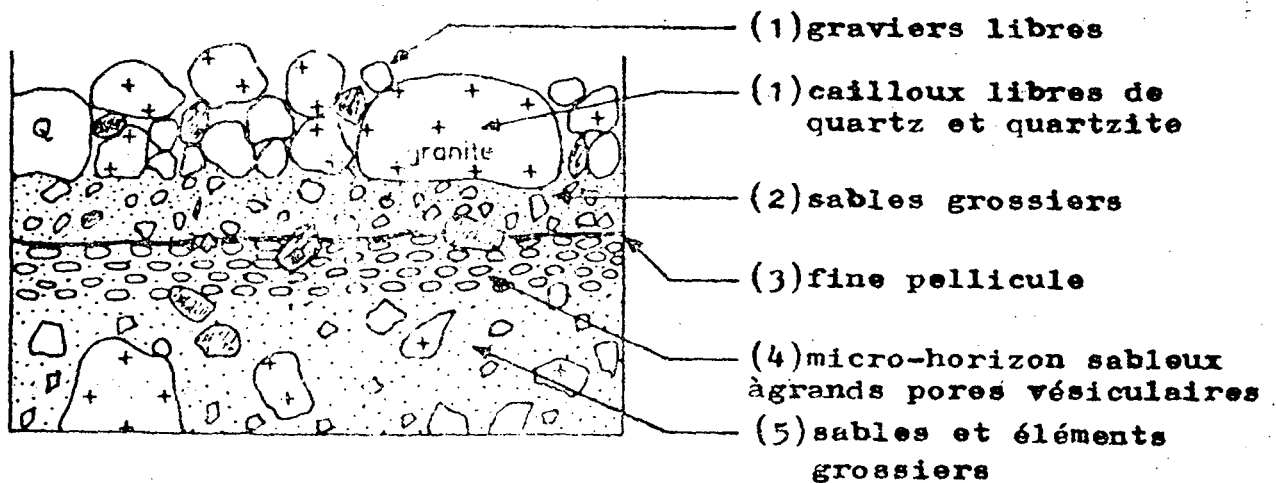
- type 30 sables fins peu épais sur sols bruns
- type 31 sables fins peu épais sur sols issus d'arènes granitiques
- type 32 sables fins en micro-buttes sur glacis
- type 33 sables fins en recouvrement épais sur glacis
- type 34 sables fins dans les micro-dépressions de l'erg ancien
- type 35 sables fins en recouvrement épais au pied des massifs rocheux
- type 36 sables fins en recouvrement épais sur l'erg vif.



**TYPE 10 ROCHE NUE, SOL LITHIQUE**



**TYPE 11 SURFACE A ELEMENTS GROSSIERS FERRUGINEUX**



**TYPE 12 SURFACE A RECOUVREMENT DE GRAVIERS ET DE CAILLOUX D'ORIGINE GRANITIQUE**

**Figure n° 2 Etats de surface à éléments grossiers - région d'Ourssi**

type 37 sables fins sur champs cultivés

Surface à pellicules plasmiques

- type 40 pellicules plasmiques sur sols sablo-argileux
- type 41 pellicules plasmiques sur sols issus d'arènes granitiques
- type 42 pellicules plasmiques sur sables fins de l'erg ancien
- type 43 pellicules plasmiques et éléments grossiers sur sables fins
- type 44 pellicules plasmiques sur micro-buttes de sables fins
- type 45 pellicules plasmiques discontinues sur sables fins
- type 46 pellicules rebroussées dans les micro-dépressions
- type 47 pellicules desquamées dans les micro-dépressions
- type 48 pellicules plasmiques sur vertisols de bas-fonds
- type 49 pellicules plasmiques sur vertisols formés sur roches basiques

1.2 - Hydrodynamique

Les mesures de ruissellement, réalisées en zone sahélienne avec le simulateur de pluies (CHEVALIER-1982 ; ALBERGEL-1987), jointes aux descriptions des parcelles de mesure, ont permis d'attribuer à chaque type d'état de surface de la région d'Oursi une ou plusieurs relations de la forme :

$$LR = aP IK + b.IK + c.P + d$$

où LR est la lame ruisselée exprimée en millimètres,  
P est la hauteur pluviométrique au sol, exprimée en millimètres  
IK est l'indice des précipitations antérieures, tel que :

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1}) e^{k.t}$$

avec t, l'intervalle de temps, exprimé en jours, séparant les pluies  $P_{n-1}$  et  $P_n$ ,

k une constante égale à - 0,5

a, b, c, d des constantes liées au type d'état de surface et à sa couverture végétale ou à son micro-relief.

Dix-sept relations, caractérisées par leurs coefficients a, b, c, d sont ainsi présentées sur le tableau n°1.

L'association entre les relations hydrodynamiques et les états de surface s'établit comme suit :

type 10 affleurement rocheux granitique	relation R	1
type 10 affleurement rocheux latéritique	relation R	2
types 11 et 12 surfaces à éléments grossiers	relation R	3
type 13 surface à épandage gravillonnaire	relation R	4
types 20 et 21 sables grossiers avec $IK < 25$	relation R	5
types 20 et 21 sables grossiers avec $IK \geq 25$	relation R	6
types 30, 31, 32, 34 et 80 % de couvert herbacé	relation R	7
types 30, 31, 32, 34 sans couvert herbacé et $p < 30$	relation R	8
types 30, 31, 34 sans couvert herbacé et $p \geq 30$	relation R	9
types 33 et 35 et 80 % de couvert herbacé	relation R	10
types 36 et 37 avec micro-relief dégradé	relation R	10
type 37 champ sarclé avec micro-relief formé	relation R	11
type 40 sur sols sablo-argileux	relation R	12
type 41 sur sols issus d'arènes granitiques	relation R	13
types 42 et 43 sur sables fins	relation R	14
type 44 sur micro-buttes de sables fins	relation R	15
type 45 pellicules discontinues sur sables fins	relation R	10
types 46 et 47 avec 70 % de couvert herbacé	relation R	16
types 46 et 47 sans couvert herbacé	relation R	17B
type 48 sur vertisols de bas-fonds	indéterminée	
type 49 sur vertisols formés sur roches basiques	indéterminée	

tableau 1 Hydrodynamique des états de surface de la région d'Oursi

relations	a	b	c	d	LR en mm p = 87 mm IK = 15
R 1	0	0	0,990	- 2,00	84
R 2	$6,0 \cdot 10^{-3}$	0,011	0,934	- 6,83	82
R 3	0	0,081	0,872	- 6,12	71
R 4	0	0,075	0,950	- 7,92	76
R 5	$2,0 \cdot 10^{-3}$	0,204	0,960	-11,0	78
R 6	0	0	0,987	- 5,31	-
R 7	0	0,145	0,468	- 9,77	33
R 8	$1,0 \cdot 10^{-2}$	0	0,901	- 6,55	-
R 9	$4,5 \cdot 10^{-4}$	0,021	0,901	- 6,55	73
R 10	$4,0 \cdot 10^{-3}$	-0,010	0,389	- 4,44	34
R 11	$5,0 \cdot 10^{-3}$	0,042	0,249	- 2,51	25
R 12	0	0,103	0,942	- 7,53	76
R 13	0	0,144	0,910	- 9,72	72
R 14	0	0	0,966	- 2,10	82
R 15	$4,6 \cdot 10^{-4}$	0,077	0,822	-10,50	63
R 16	0	0,154	0,861	-11,57	66
R 17	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,039	0,902	-8,13	72

2 - LA REPARTITION DES ETATS DE SURFACE SUR  
LE BASSIN VERSANT DE LA MARE D'OURSI.

2.1 - Photointerprétation des images satellitaires SPOT

Le paysage de la région d'Oursi se subdivise en quatre grandes unités : le système dunaire qui comprend l'erg ancien, l'erg récent et les jupes sableuses ; les massifs rocheux, buttes cuirassées et inselbergs ; les glacis qui se distinguent les uns des autres par leur recouvrement minéral ; les bas-fonds, les thalwegs et les mares formant le réseau hydrographique.

L'examen visuel des images SPOT, prises dans la région d'Oursi au cours de l'hivernage 1986, montre que les grandes unités de paysage peuvent être décomposées en zones visuellement homogènes, homogènes par leur composition colorée, la taille de leurs éléments, leur texture et leur structure. Dans un premier temps nous nous sommes attachés à l'interprétation de l'image SPOT prise le 4 septembre 1986, dont la clef de l'interprétation des couleurs est la suivante : la couleur rouge est associée à l'existence d'une végétation chlorophyllienne herbacée, arborée ou aquatique ; la couleur vert foncé est associée à l'existence de sols nus et d'éléments grossiers à la surface du sol :

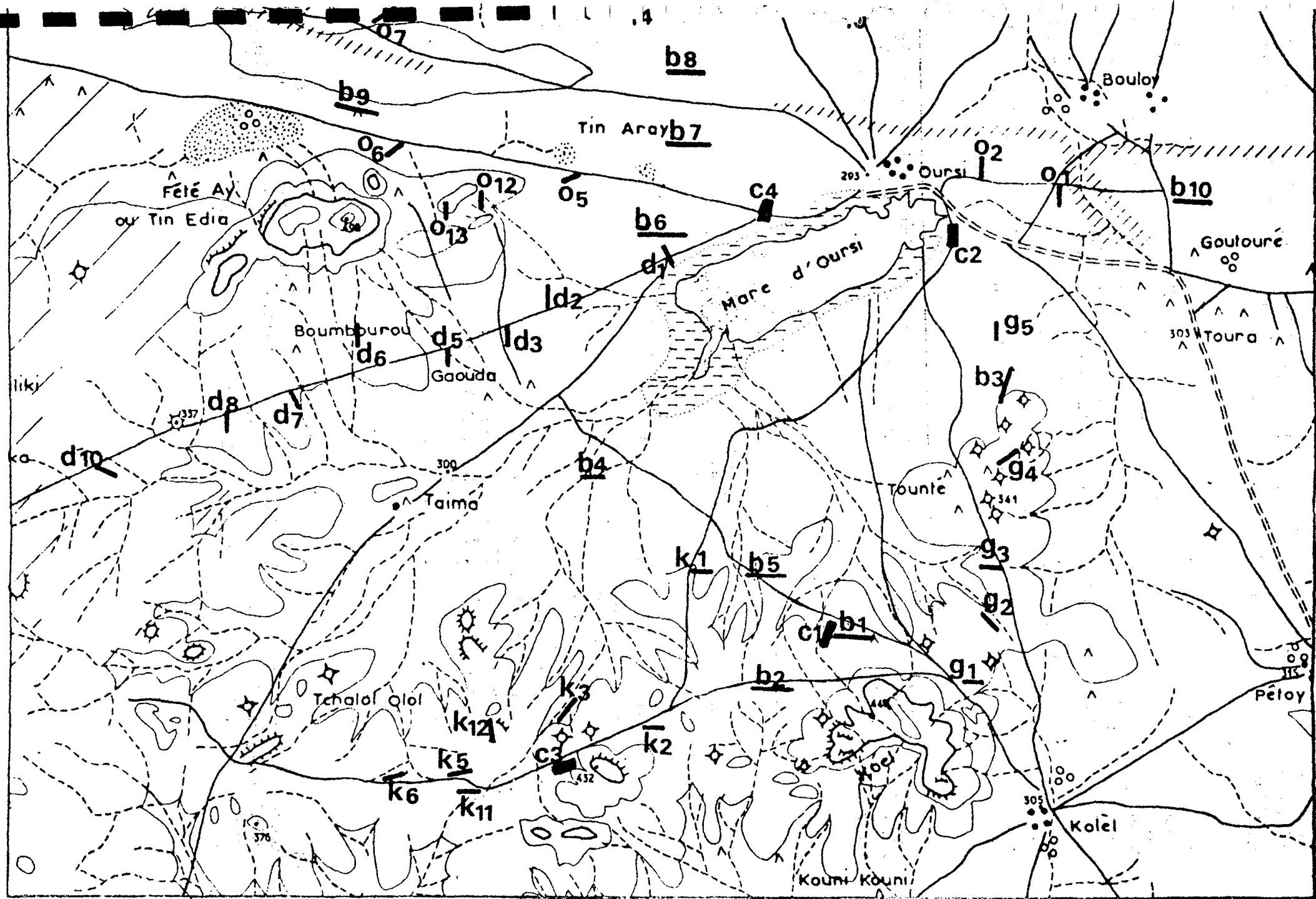


figure n° 3 Localisation des lions et gazelles observées en 1986

rochers, cailloux, graviers, gravillons ferrugineux, cuirasse latéritique ; la couleur vert clair à gris très clair est associée aux sables grossiers d'origine granitique ; la couleur jaune est associée aux sables fins d'origine éolienne : dunes et jupes sableuses.

En ce qui concerne les formes des taches colorées, les formes ramifiées caractérisent le réseau hydrographique. Il converge vers les bas-fonds et les mares, fournissant ainsi une idée de la topographie. Les formes massives aux bords découpés caractérisent les massifs rocheux : Ko Warga, Gouba, Tin Edjar, d'où divergent les ramifications du réseau hydrographique. Les formes en flots caractérisant les buttes cuirassées et les inselbergs granitiques : Kouni-Kouni, Djalafanka, Gountouré. Les formes en îles allongées, très découpées, caractérisent l'affleurement de cuirasses latéritiques ennoyées sous un sol peu épais. Les larges bandes claires, orientées d'Ouest en Est, caractérisent le système dunai- re qui se fragmente en taches claires aux formes ambiennes phagocytant les pointements rocheux.

## 2.2 - Echantillonnage au sol des zones visuellement homogènes

Les zones visuellement homogènes sur les images SPOT ont été décrites au sol par des lignes d'observation longues de 500 mètres à 1 kilomètre, appelées transects, qui se répartissent dans le paysage de la façon suivante :

- erg récent :  
transects B 6, B 7, B 9, B 10, O 1 et O 2  
champs C 2 et C 4
- erg ancien :  
transects B 8, O 7, O 10 et O 14
- jupes sableuses au pied de l'erg récent :  
transects D 1, O 5 et O 6
- jupes sableuses autour des massifs rocheux :  
transects B 3, B 6, G 1, G 4 et O 12  
champs C 1 et C 3
- massifs rocheux :  
transects K 12 et O 13
- bas-fonds :  
transect B 4
- glaciais pierreux :  
transects K 2 et K 11
- glaciais à gravillons ferrugineux ;  
transects D 2, D 3, D 8, D 10 et K 1
- glaciais sur sols bruns nus :  
transects B 1, B 5, K 2, K 3 et K 6
- glaciais sur sables fins et gravillons ferrugineux :  
transects D 7 et O 12
- glaciais sur arènes granitiques :  
transects B 2, B 3, G 5.

Les lignes d'observation et les champs, localisés sur la figure n° 3 ne sont pas répartis uniformément sur l'ensemble du bassin versant de la mare d'Oursi. Ils sont essentiellement disséminés le long des pistes, seules voies praticables en saison des pluies, qui constituent des repères commodes pour la localisation des transects sur les photographies aériennes.

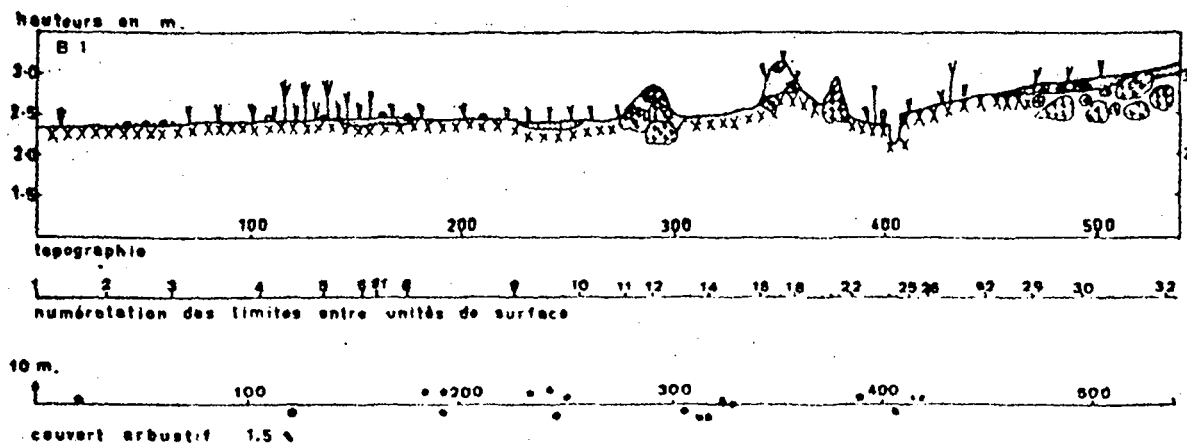


figure 4 Ligne B 1 - Sols bruns subarides vertiques glacis bas Kolel - observations du 29/08/87

tableau 2 Description chiffrée de la ligne B 1

Ligne B 1 Sol unité n° 8  
 type : sols bruns subarides vertiques en association  
 aux sols bruns subarides modaux.

limites entre unités homogènes	distances en m.	Mesures de radiométriques canaux	Mesures radiométriques canaux SPOT			végétation herbacée couvert en %		types d'états de surface . répartition en %				
			XS1	XS2	XS3	verte	sèche	40	11	30	44	10
1-2	34,0	13	142	217	258	15	2	85	10	5	.	.
2-3	30,0	12	154	234	258	1	1	60	40	.	.	.
3-4	38,8	16	153	232	284	23	2	85	10	5	.	.
4-5	30,2	12	143	228	304	45	2	75	20	5	.	.
5-6	19,4	8	145	216	288	40	2	30	10	60	.	.
6-7	7,6	3	139	196	300	35	5	20	20	60	.	.
7-8	15,7	6	124	173	292	35	5	20	20	60	.	.
8-9	50,1	19	144	220	287	20	2	80	10	10	.	.
9-10	31,1	12	136	209	300	50	2	15	.	80	.	5
10-11	21,1	8	121	176	274	10	1	90	.	10	.	.
11-12	13,0	5	123	174	305	.	.	.	.	.	50	40
12-13	6,0	3	137	209	291	.	.	.	.	.	60	40
13-14	19,0	7	149	230	282	5	1	95	.	5	.	.
14-15	23,0	9	140	214	279	5	1	95	.	5	.	.
15-18	16,8	7	156	244	313	20	5	.	.	.	70	30
18-19	14,2	6	149	231	303	2	1	88	.	2	.	10
19-21	5,6	2	158	241	300	5	1	.	.	.	50	50
21-22	8,1	3	143	218	283	5	1	95	.	5	.	.
22-23	16,7	7	140	214	304	40	5	50	.	50	.	.
23-25	3,6	2	115	159	298	.	.	100	.	.	.	.
25-26	16,4	6	132	180	310	20	2	80	.	20	.	.
26-27	15,8	7	134	203	312	40	2	80	.	20	.	.
27-28	8,8	3	133	228	331	2	1	.	.	70	.	30
28-29	22,0	9	152	243	300	2	1	.	.	70	.	30
29-30	23,7	10	144	224	310	25	2	50	.	45	.	5
30-31	3,3	1	149	244	337	25	2	.	.	50	.	50
31-32	38,0	10	154	254	317	25	2	.	.	100	.	.

Distance : 533,0 mètres observations effectuées le 29/08/1986

### 2.3 - Description des lignes d'observation

Après avoir identifié les principaux types d'état de surface représentés sur la ligne, on chemine sur toute la longueur du transect en effectuant des relevés topographiques et en notant les caractéristiques propres à chaque état de surface rencontré : longueur, relief, couvert minéral, couvert végétal, activités animales, indices de migration des matériaux.

Nous avons sélectionné, pour illustrer notre propos, le dessin figuratif du transect B 1 (figure n° 4), complété par son tableau descriptif (tableau n° 2). Sur ce transect, l'unité homogène la plus longue ne dépasse pas 50 mètres et la plupart des unités homogènes ont des longueurs comprises entre 15 et 30 mètres. Ces unités sont elles-mêmes formées d'au moins deux types d'états de surface différents. On comprend ainsi aisément l'impossibilité d'associer chaque pixel de l'image SPOT, de longueur 20 mètres, à un seul état de surface. Dans leur grande majorité les pixels SPOT couvrent au moins deux états de surface aux caractéristiques différentes.

### 2.4 - Hydrodynamique des transects

Chaque ligne d'observation est constituée d'états de surface aux caractéristiques hydrodynamiques connues ; sans tenir compte des effets dus au transfert des eaux de ruissellement, nous avons formulé pour chaque transect une relation hydrodynamique de la forme :

$$RT^j = \sum_{i=1}^n a_i \cdot R_i \quad \text{avec} \quad a_i = \frac{l_i}{L}$$

et  $RT^j$  la relation hydrodynamique du transect j,

$l_i$  la longueur occupée sur le transect j par l'état de surface i,

$R_i$  la relation hydrodynamique de l'état de surface i,

L la longueur totale du transect j.

Une utilisation intéressante de ces relations consiste à calculer, pour chaque transect, la hauteur d'eau de fréquence décennale disponible pour le ruissellement, hauteur d'eau que nous appellerons lame non-infiltrée de fréquence décennale.

Les mesures au pluviomètre standard, surface réceptrice de 400 cm<sup>2</sup> placée à 1 mètre du sol, permettent d'estimer la pluie ponctuelle journalière de fréquence décennale à environ 67 millimètres dans la région d'Oursi. Les mesures simultanées de la pluie au sol et de la pluie récoltée à 1 mètre au-dessus de la surface du sol (CHEVALIER-1987) montrent que, dans la région d'Oursi, les quantités d'eau de pluie récoltées au sol sont 1,3 fois plus fortes que les quantités récoltées à 1 mètre au-dessus, lorsque le couvert arboré ou arbustif est très clairsemé. Sur le bassin versant de la mare d'Oursi, la pluie ponctuelle journalière de fréquence décennale est donc estimée à environ 87 millimètres au niveau du sol.



En supposant que la pluie de fréquence décennale survient dans des conditions moyennes d'humectation des sols, c'est à dire pour un indice de Kohler égal à 15 millimètres, nous avons calculé cas par cas les lames non-infiltrées correspondantes.

Il est alors très pratique de classer les transects en fonction croissante des lames non-infiltrées de fréquence décennale, c'est à dire de leur aptitude au ruissellement.

Le résultat de ce classement est le suivant. :

classe 1 : Lame non-infiltrée de fréquence décennale inférieure ou égale à 30 millimètres  
champs sarclés sur sables fins très épais, champs C 2 et C 4  
C 2 RT = 0,84 R11 + 0,16 R10 LNI = 26

classe 2 : Lame non-infiltrée de fréquence décennale supérieure à 30 millimètres et inférieure ou égale à 40 millimètres  
transects sur sables fins très épais couverts à moins de 10 % de pellicules plasmiques : B 6, B7, B 9, B10, D 1, G 1, O 1, O 2, O10, O14, champs non sarclés C 2, C 3 et C 4  
O14 RT = 0,12 R 7 + 0,88 R10 LNI = 34

classe 3 : Lame non-infiltrée de fréquence décennale supérieure à 40 mm et inférieure ou égale à 50 mm  
transects sur sables fins couverts à plus de 10 % et moins de 25 % par des pellicules plasmiques : O 5, O 7, O11  
O 7 RT = 0,80 R10 + 0,20 R14 LNI = 44

classe 4 : Lame non-infiltrée de fréquence décennale supérieure à 50 mm et inférieure ou égale à 60 mm  
transects sur sables fins couverts à plus de 25 % et moins de 50 % par des pellicules plasmiques  
O 6 RT = 0,63 R10 + 0,37 R14 LNI = 52

transects sur glacis recouverts à plus de 30 % de sables fins peu épais bien enherbés : B 3, B 5, champ C 1, B 1  
B 3 RT = 0,03 R 3 + 0,30 (R 5 ou R 6) + 0,34 R 7 + 0,22 R13 + 0,11 R16 LNI = 60

classe 5 : Lame non-infiltrée de fréquence décennale supérieure à 60 mm et inférieure ou égale à 70 mm  
transects sur glacis et jupes sableuses couverts entre 15 % et 30 % de sables fins bien enherbés : G 3, G 4, G 5, K11, D 2, B 2  
D 2 RT = 0,17 R 3 + 0,45 (R 5 ou R 6) + 0,20 R 7 + 0,18 R13 LNI = 67

classe 6 : Lame non-infiltrée de fréquence décennale supérieure à 70 mm et inférieure ou égale à 75 mm  
transects sur glacis couverts à moins de 15 % de sables fins : D 5, D10, D 3, D 7, K 1

$$D 3 \quad RT = 0,15 R 3 + 0,35 (R 5 \text{ ou } R 6) + 0,06 R 7 \\ + 0,44 R 12$$

LNI = 73

classe 7 : lame non-infiltrée de fréquence décennale supérieure à 75 millimètres

transects sur sols bruns couverts à plus de 50 % par des pellicules plasmiques, sur glacis couverts à plus de 60 % par des gravillons ferrugineux : D 8, K 2, K 3, G 2

$$K 2 \quad RT = 0,18 R 3 + 0,17 (R 5 \text{ ou } R 6) + 0,15 (R 8 \text{ ou } R 9) \\ + 0,41 R 12 + 0,09 R 14$$

LNI = 76

### 2.5 - Conclusion des observations au sol

La plupart des états de surface de la région d'Oursi, autres que les surfaces à sables fins, présentent de fortes aptitudes au ruissellement avec des lames non-infiltrées de fréquences décennales supérieures à 65 millimètres pour une pluie au sol égale à 87 millimètres.

Les surfaces à sables fins, où l'activité éolienne provoque des accumulations de matériaux et remodèle la surface du sol en créant des micro-reliefs bien marqués, et les champs cultivés, dont la surface du sol est remaniée par le sarclage, ont les aptitudes les plus faibles au ruissellement avec des lames non-infiltrées inférieures à 30 mm pour une pluie au sol de 87 millimètres.

Les surfaces à sables fins, bien couvertes par la végétation herbacée, ont également une faible aptitude au ruissellement : une lame non-infiltrée inférieure à 35 mm pour une pluie au sol égale à 87 mm. Cependant, sur les mêmes sols sableux fins, la disparition du couvert herbacé et l'apparition des pellicules plasmiques provoquent un saut quantitatif important de l'aptitude au ruissellement avec une lame non-infiltrée de fréquence décennale supérieure à 60 millimètres.

A l'échelle des transects, observés au cours de l'hivernage 1986 dans la région d'Oursi, la classification hydrologique met également en évidence une relation étroite entre la croissance de l'aptitude des transects au ruissellement et la diminution du couvert sableux fin et de sa végétation herbacée. Nous chercherons donc, pour l'interprétation hydrologique des images SPOT dans la région d'Oursi, à analyser les images en dégagant plus particulièrement l'importance du couvert sableux fin et de sa couverture végétale.

## 3 - CARTOGRAPHIE DES APTITUDES AU RUISSellement ET A L'INFILTRATION DES SOLS DE LA REGION D'OURSIS

### 3.1 - Cartographie des aptitudes au ruissellement par photointerprétation des images SPOT

La photointerprétation des images SPOT nous conduit logiquement à établir des correspondances entre l'aspect visuel des zones homogènes entourant les transects sur les images SPOT et l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration de ces mêmes transects. A chaque zone visuellement homogène on attribue ainsi, soit directement lorsque la zone est échantillonnée par un transect, soit indirectement par analogie visuelle, une relation hydrodynamique et une lame non-infiltrée de fréquence décennale.

Compte tenu de l'influence du couvert végétal herbacé sur l'aptitude des sols au ruissellement, il est préférable d'utiliser des images satellitaires prises pendant la phase la plus active du cycle végétatif des plantes au cours de la saison des pluies.

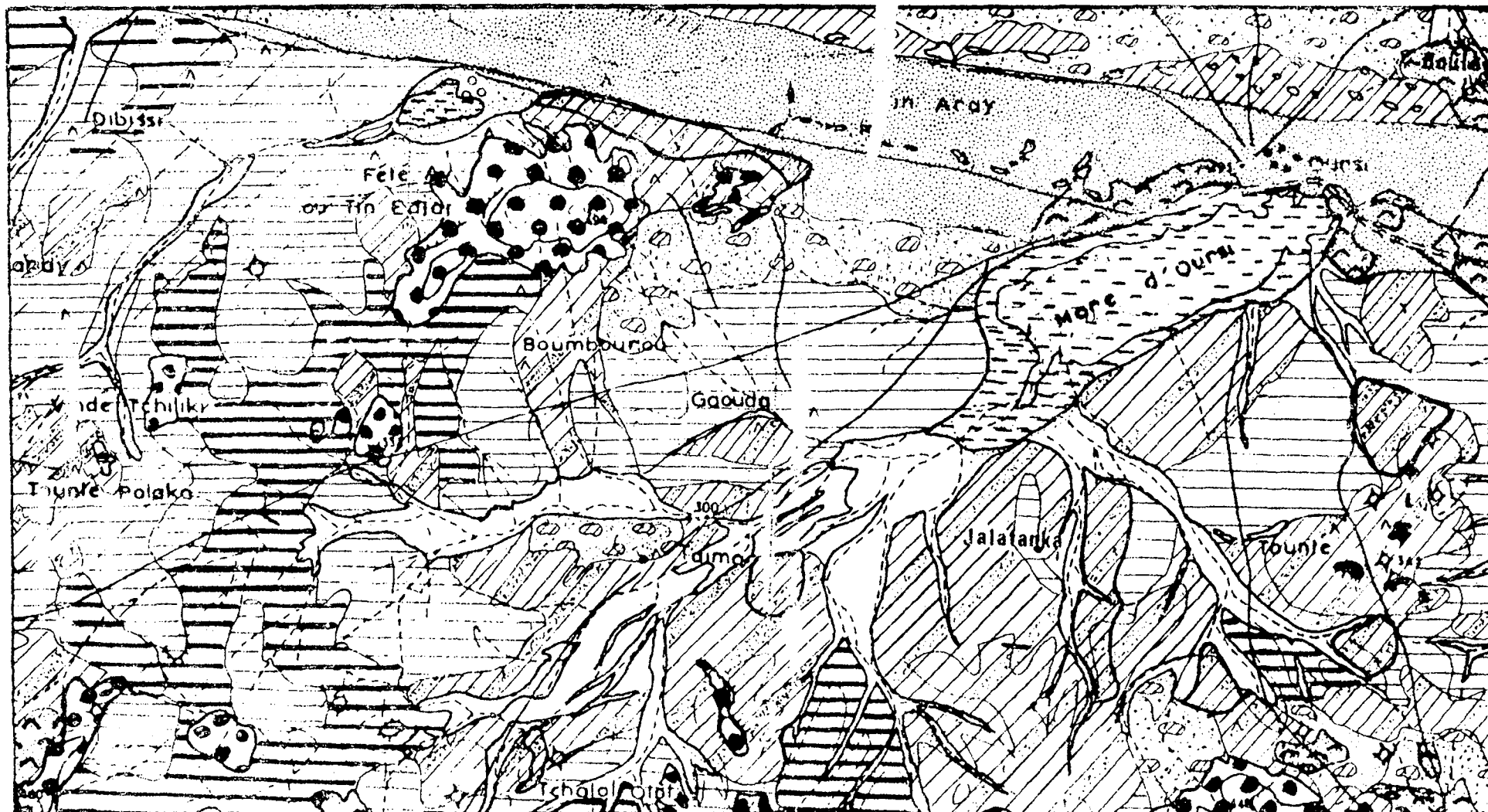


FIGURE n° 5 Carte des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols de la région d'Oursi - échelle 1/100 000 ème

LEGENDE

1		LNI < 30 mm	4		50 < LNI < 60 mm		massifs rocheux
2		30 < LNI < 40 mm	5		60 < LNI < 70 mm		bas-fonds
3		40 < LNI < 50 mm	6		70 < LNI < 75 mm		mars en eau
			7		75 < LNI		

LNI = lame non-infiltrée de fréquence décennale pour P = 87 mm, IK=15

Nous présentons sur la figure n° 5 les résultats de l'interprétation hydrologique, de l'image prise par le satellite SPOT dans la région d'Oursi le 4 septembre 1986, sous la forme d'une carte à l'échelle 1/100 000 ème des lames non-infiltrées de fréquence décennale. Les lames non-infiltrées sont calculées pour une pluie au sol de fréquence décennale estimée à 87 millimètres.

Pour représenter les classes d'aptitude au ruissellement nous avons choisi des figurés qui symbolisent la diminution progressive du couvert sableux fin.

Le passage de la carte des lames non-infiltrées à la carte des lames ruisselées sur les bassins versants nécessite plusieurs opérations que nous détaillerons ultérieurement. L'examen visuel de l'image SPOT permet déjà de faire quelques remarques. Sur l'erg récent, l'absence du réseau de drainage permet de conclure à l'absence de ruissellement pour des bassins versants de superficie supérieure au kilomètre carré. Sur l'erg ancien, le morcellement très inégal du réseau hydrographique oblige à considérer les bassins versants cas par cas selon leur taille et leur position. Sur les massifs rocheux, les bassins versants sont de petite taille et la lame ruisselée de fréquence décennale y est d'environ 20 millimètres, valeur observée sur le bassin versant de Kolel à l'intérieur du massif de gabbros.

Dans la définition des lames ruisselées, le réseau hydrographique, par sa forme et son tracé, va donc jouer un rôle de premier plan.

### 3.2 - Cartographie des aptitudes au ruissellement par interprétation numérique des images SPOT

La photointerprétation des compositions colorées montre qu'il existe une relation très nette entre la granulométrie des couverts minéraux à la surface des sols de la région d'Oursi et la clarté ou l'opacité des couleurs sur les images SPOT. L'influence de la végétation sur le ruissellement des sols sableux fins apparaît d'autre part suffisamment explicite pour justifier l'utilisation du couvert végétal comme indice de l'aptitude des sols au ruissellement. Il semble donc judicieux de constituer, pour l'interprétation hydrologique numérique des images SPOT prises en saison des pluies dans la région d'Oursi, les indices suivants, calculés à partir des valeurs numériques des trois canaux SPOT XS1, XS2 et XS3 :

- l'indice de brillance,  $IB = XS3 + XS2 - 100$
- l'indice de végétation,  $IV = 255 \cdot \frac{XS3}{XS3 + XS2}$
- l'indice de couleur des sols,  $IC = 255 \cdot \frac{XS2}{XS1 + XS2}$

Pour identifier numériquement un transect, il nous a paru nécessaire d'augmenter la surface au sol représentative du transect de manière à atteindre un nombre de pixels suffisant, voisin de 100, permettant une représentation statistique des indices de brillance, de végétation et de couleur des sols.

Les opérations d'identification numérique ont été effectuées au Centre Régional de Télédétection de Ouagadougou sur péricolor 1000 avec des procédures de traitement mises au point à l'Unité de Télédétection de l'ORSTOM à Bondy (M. RAKOTO ; B. LORTIC). Les résultats de l'identification numérique des transects sont présentés sur les figures n° 6 et 7 ci-jointes.

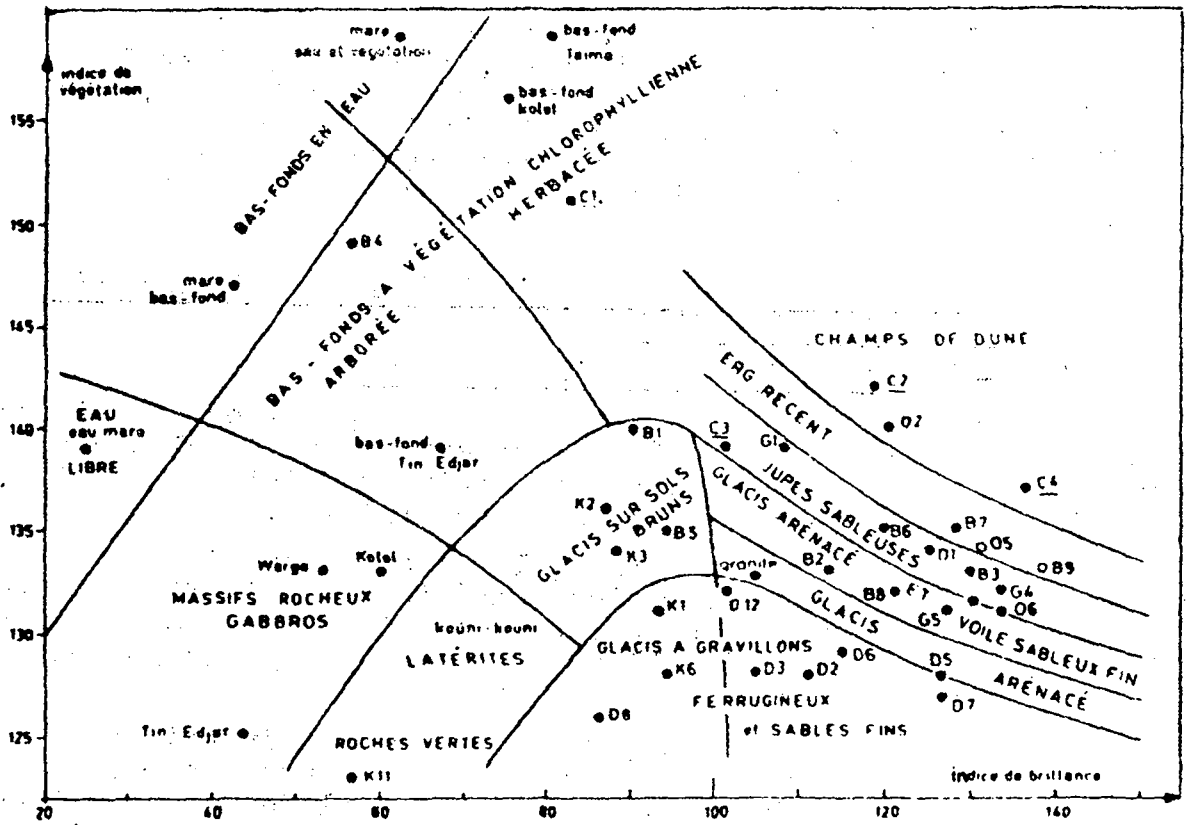


Figure n° 6 : Représentation numérique des transects dans le plan des indices brillance et végétation

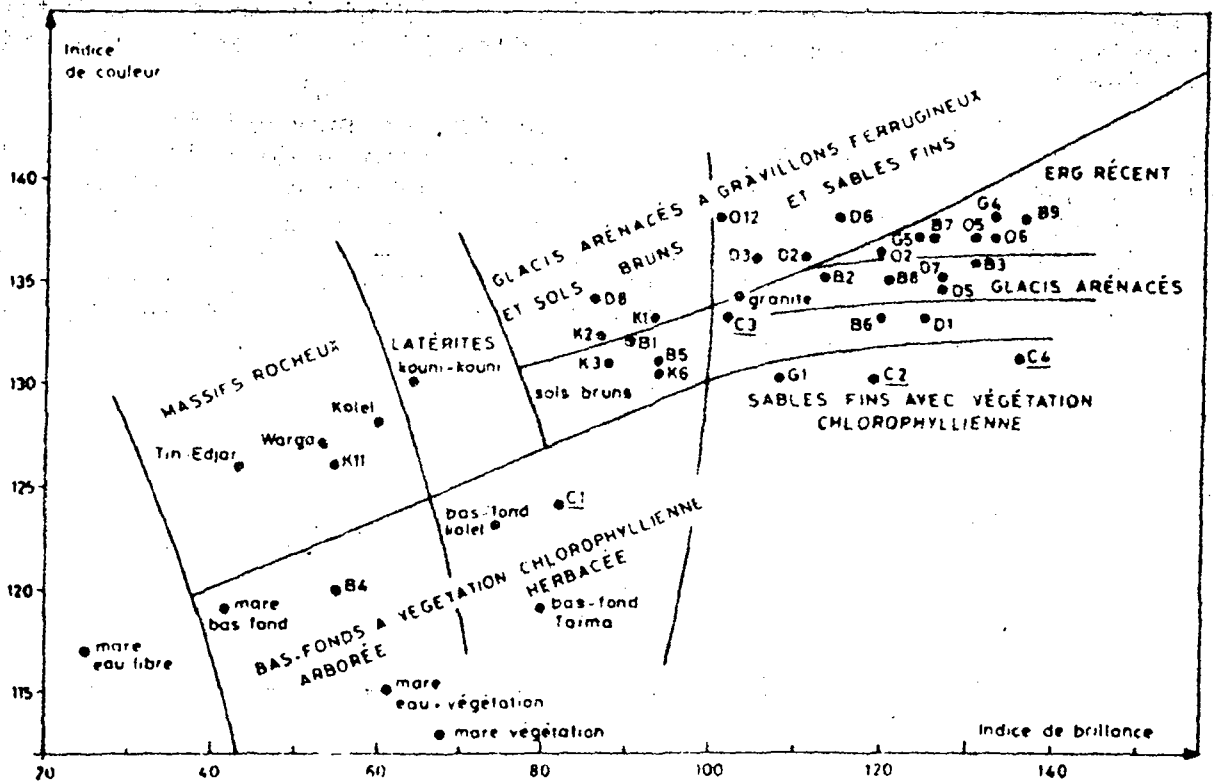


Figure n° 7 : Représentation numérique des transects dans le plan des indices brillance et couleur

L'utilisation des mêmes procédures permet d'identifier numériquement, par les indices brillance, végétation et couleur, des parties de bassin versant, visuellement homogènes sur les compositions colorées, puis de comparer leurs caractéristiques numériques à celles des transects. Il est ainsi possible de cartographier de proche en proche, par une procédure semi-automatique, l'aptitude au ruissellement des sols d'un bassin versant.

#### 4 - UTILISATION DES CARTES D'APTITUDE AU RUISSELLEMENT ET A L'INFILTRATION

##### 4.1 - Modélisation des ruissellements

Le ruissellement est un phénomène complexe où l'aptitude des sols au ruissellement joue un rôle fondamental qui n'exclut cependant pas l'influence d'autres facteurs : hétérogénéité spatiale des pluies, relief, micro-relief, nature et forme du réseau de drainage.

A l'échelle du mètre carré, les mesures au simulateur de pluies mettent en évidence, dans les régions sahéliennes, l'influence prépondérante de l'état de surface des sols sur l'aptitude des sols au ruissellement ; elles permettent d'établir des relations hydrodynamiques liées à une description de la surface des sols.

A l'échelle du versant, sur des surfaces inférieures au kilomètre carré, on ne dispose que de très peu de mesures de ruissellement global et il apparaît difficile, en l'état actuel de nos connaissances, de dégager précisément l'influence des différents facteurs qui concourent à produire le ruissellement global. Par interprétation des images satellitaires il devient cependant possible de connaître la répartition des états de surface le long du versant mais plusieurs recherches complémentaires, de nombreuses mesures et descriptions de versants, seront probablement nécessaires avant de dégager définitivement les influences respectives des facteurs susceptibles d'expliquer le ruissellement à cette échelle.

A l'échelle des bassins versants, de superficie supérieure à quelques kilomètres carrés, de nombreuses mesures de ruissellement global sont disponibles et il devient possible d'effectuer des calages de modèles hydropluviométriques. L'étude hydrologique de la mare d'Oursi (P. Chevalier, J. Claude, B. Pouyaud, A. Bernard - 1985) fournit un excellent exemple de l'utilisation d'images satellitaires Landsat pour la définition des fonctions de production d'un modèle à discrétisation spatiale (modèle Girard, Morin, Charbonnel - 1972). En améliorant la connaissance de la répartition des états de surface sur les bassins versants, la méthode développée dans cet article est donc susceptible d'être utilisée dans la définition des fonctions de production des modèles déterministes. En l'absence de toute mesure de ruissellement global sur un bassin versant, la connaissance de la répartition des états de surface par interprétation des images satellitaires élimine déjà, en zone sahélienne, une des inconnues les plus gênantes pour la modélisation des ruissellements.

##### 4.2 - Détermination des lames ruisselées de fréquence décennale

Une utilisation privilégiée des cartes d'aptitude au ruissellement semble être leur utilisation pour la prédétermination des lames ruisselées à l'échelle des bassins versants, sous réserve que des relations puissent être dégagées entre les lames non-infiltrées et les lames ruisselées.

Pour le calcul des lames non-infiltrées à l'échelle des bassins versants, il est préalablement nécessaire de faire intervenir l'hétérogénéité spatiale des pluies en utilisant un coefficient d'abattement pour le calcul de la pluie moyenne sur le bassin. Le coefficient d'abattement est déterminé en Afrique intertropicale par la formule de Vuillaume :

$$K = 1 - (9 \text{ Log } r - 42.10^{-3} P + 152 \pm 10). 10^{-3} \text{ Log } S$$

avec  $r$  la période de retour exprimée en années,  
 $P$  la pluviométrie interannuelle exprimée en millimètres,  
 $S$  la superficie du bassin en kilomètre carré.

Dans la zone sahélienne, il faut également tenir compte des différences observées entre la pluie mesurée au pluviomètre standard placé un mètre au-dessus du sol et la pluie observée au niveau du sol (Chevalier-1987). Dans la région d'Oursi, le coefficient multiplicateur, permettant de calculer la pluie au sol à partir de la pluie observée à 1 mètre du sol, est estimé à 1,3. La pluie ponctuelle journalière de fréquence décennale est estimée dans la région d'Oursi à 67 millimètres lorsque le pluviomètre est placé 1 mètre au-dessus du sol.

Les calculs des lames non-infiltrées de fréquence décennale et des lames ruisselées de même fréquence sur cinq bassins versants situés autour de la mare d'Oursi donnent les résultats suivants exprimés en millimètres :

bassin versant	superficie <sup>2</sup> en km <sup>2</sup>	coeff. d'aba. K	pluie moyen. à 1 m	pluie moyen. au sol	lame non infiltrée LNI	lame ruiss. LR	écart LNI-LR
Polaka	9,14	0,86	58	75	42	19	23
Tchalol	9,3	0,86	58	75	55	36	19
Outardes	16,5	0,83	56	73	44	28	16
Gountouré	25	0,81	54	70	46	35	11
Taïma	105	0,71	48	62	41	25	16

Les écarts observés entre les lames non-infiltrées de fréquence décennale et les lames ruisselées de même fréquence, estimées à partir des observations de ruissellement global, ne semblent pas liés à la superficie des bassins. En prenant un écart constant, égal à 17 millimètres, l'erreur commise sur l'estimation de la lame ruisselée de fréquence décennale reste négligeable pour les bassins de Tchalol, Outardes et Taïma ; elle reste acceptable (- 17 %) pour le bassin de Gountouré, mais elle est excessive (+ 30 %) pour le bassin de Polaka.

Pour affiner l'estimation des lames ruisselées sur un bassin versant, il semble donc indispensable de faire intervenir d'autres facteurs liés au cheminement des eaux à la surface des sols. Relativement aux normes moyennes, l'écoulement des eaux sur un sol sableux perméable est en effet susceptible de limiter le ruissellement global (cas du bassin de Polaka), alors que le cheminement des eaux sur un sol peu perméable (cas du bassin de Gountouré) est susceptible de l'augmenter dans des proportions non négligeables.

## 5 - CONCLUSION

Les images SPOT, prises en saison des pluies, constituent de bons documents de travail pour cartographier l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des sols d'un bassin versant sahélien. L'originalité de notre méthode consiste à identifier sur les images SPOT des zones visuellement homogènes ou radiométriquement homogènes, décrites au sol par des lignes d'observation auxquelles on associe des relations hydrodynamiques fournissant les lames d'eau disponibles pour le ruissellement et les lames d'eau disponibles pour l'infiltration. La publication prochaine d'un recueil des états de surface en Afrique de l'Ouest (C. Valentin, A. Casenave - ORSTOM - Abidjan), où chaque état de surface sera caractérisé par une relation hydrodynamique, devrait faciliter l'utilisation de cette méthode aux régions plus méridionales de l'Afrique.

Le calcul des lames ruisselées aux exutoires des bassins versants fait intervenir d'autres facteurs tels que l'hétérogénéité spatiale des averses, la nature et la forme du réseau hydrographique, le cheminement des eaux le long des versants, facteurs dont les effets sur le ruissellement global ne sont pas encore bien connus.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J.) - Génèse et prédétermination des crues au Burkina Faso - Thèse de doctorat de l'université - PARIS 6, 341 pages, 1987.
- CHEVALIER P., CLAUDE J., POUYAUD B., BERNARD A. - Pluies et crues au Sahel - Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Faso, 1976-1981)  
Editions de l'ORSTOM, Travaux et documents n° 190, 251 pages, 1985.
- CHEVALIER (P.) , LAPETITE (J.M.) - Note sur les écarts de mesure observés entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest - Hydrologie continentale, vol. 1, n° 2, 1986 : pages 111-119.
- CHEVALIER (P.) - Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (mare d'Oursi - Haute Volta)  
centre ORSTOM d'Adiopodoumé, Abidjan, Côte d'Ivoire  
105 pages - 1982
- VALENTIN (C.) - Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez, république du Niger)  
Editions de l'ORSTOM, Etudes et Thèses, Paris 259 pages  
1985.
- CASENAVE (A.) - Le minisimulateur de pluie : conditions d'utilisation et principe de l'interprétation des mesures.  
Cahiers ORSTOM, série hydrologie, volume XIX n° 4, 1982, pages 207 à 227.



COMMUNICATION /° 11

TITRE : RECONNAISSANCE DE LA PLUVIOMETRIE EN ZONE  
INTERTROPICALE - TENTATIVE DE TELEDETECTION  
APPLICATION A LA REGION DE OUAGADOUGOU

AUTEUR : J.P. CARBONNEL  
CNRS / UNIVERSITE PARIS VI.

**COMPARAISON DES DONNEES SATELLITAIRES INFRAROUGE  
ET DES MESURES AU SOL CONCERNANT L'EPISODE PLUVIEUX  
DU 12 AU 13 JUIN 1986  
DANS LA REGION DE OUAGADOUGOU (BURKINA-FASO)**

par P. HUBERT \*, W. THIAO \*\*, D. CADET \*\*, J.P. CARBONNEL \*\*\* et M. DESBOIS \*\*

**I. Présentation de l'épisode**

L'averse observée dans la nuit du 12 au 13 juin 1986 dans la région de Ouagadougou (Burkina-Faso) a été provoquée par le passage d'une ligne de grains ayant pris naissance le 12 en fin de journée, à l'est du Burkina-Faso, et qui a disparu le 13 en milieu de journée au dessus du sud-ouest du Mali (fig. 1). Cette ligne de grains a traversé



Figure 1. — TRAJECTOIRE DES AMAS NUAGEUX AYANT INTERESSE LES PAYS DU CILSS LES 12 ET 13 JUIN, D'APRES AGRHYMET (1986).

\* Centre d'Informatique Géologique, Ecole des Mines de Paris, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau.

\*\* Laboratoire de météorologie dynamique, Ecole Polytechnique, 91125 Palaiseau Cedex.

\*\*\* Laboratoire de géologie dynamique, Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75230 Paris Cedex 05.

le degré carré de Ouagadougou (11-12 degrés de latitude nord, 1-2 degrés de longitude ouest, soit environ 100 km x 100 km), de 23 heures le 12 juin, à 7 heures le 13 juin, avançant dans la direction de l'est nord-est à l'ouest sud-ouest, à une vitesse de l'ordre de 60 km/h (fig. 2).

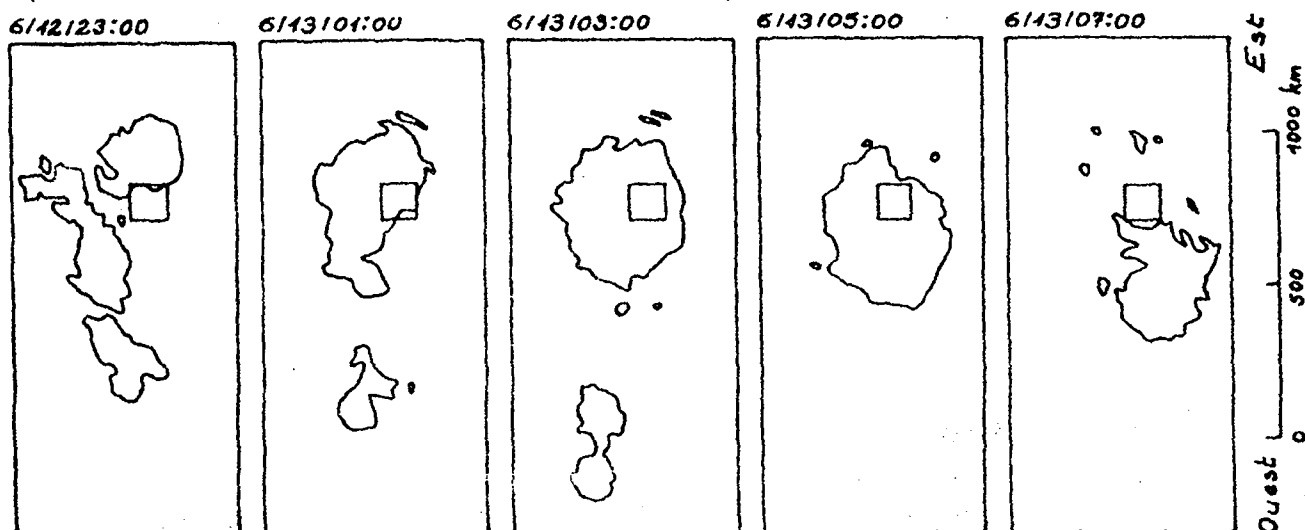


Figure 2. — EVOLUTION DE L'AMAS NUAGEUX INTERESSANT LA REGION DE OUAGADOUGOU (Burkina-Faso) DANS LA NUIT DU 12 AU 13 JUIN 1986. D'après les images infrarouge du satellite Météosat 2 avec seuil à 50 unités de compte radiométrique (environ  $-40^{\circ}\text{C}$ ).

## 2. Caractéristiques de l'averse

L'averse consécutive au passage de cette ligne de grains a pu être étudiée grâce à un réseau de stations de mesures disséminées dans le degré carré de Ouagadougou et ses abords immédiats qui a fonctionné pendant tout l'été 1986 (1). Pour l'épisode qui nous intéresse ici, 111 stations fonctionnaient. 103 stations de mesures comportaient un pluviomètre et les observateurs y ont noté, outre la hauteur de l'averse, l'heure du début et de la fin de la précipitation. Huit stations étaient dotées d'un pluviographe, dont les enregistrements ont été dépouillés selon un pas de temps horaire.

En ce qui concerne la hauteur de l'averse, les mesures présentent une importante dispersion. Elles s'étendent de 0 à 73,2 mm avec une moyenne de 27,3 mm et un écart type de 14,8 mm. Elles présentent une asymétrie légèrement positive (coefficient d'asymétrie  $C_s = 0,56$ ). Leur histogramme est représenté sur la figure 3.

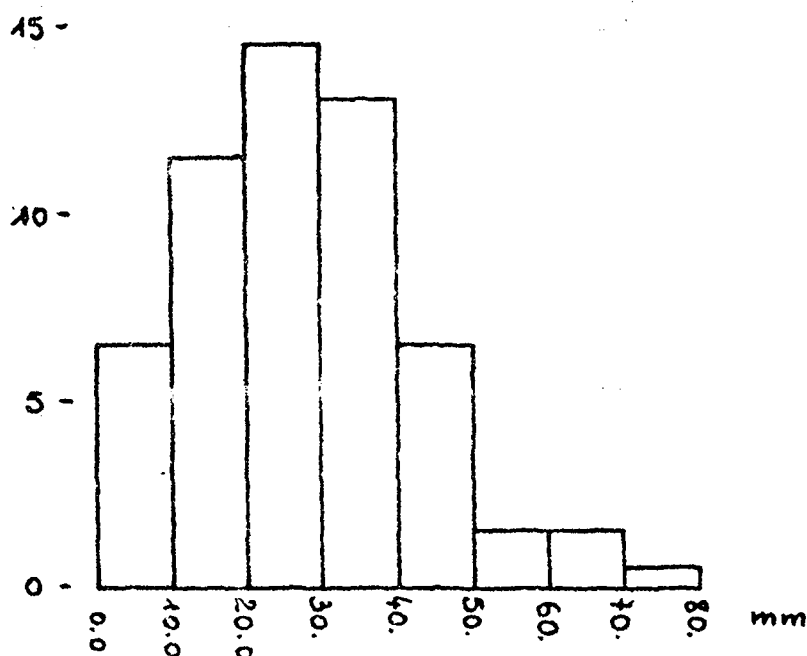


Figure 3. — HISTOGRAMME DES 111 MESURES PLUVIOMETRIQUES DE L'averse OBSERVEE DANS LA NUIT DU 12 AU 13 JUIN 1986 DANS LA REGION DE OUAGADOUGOU (Burkina-Faso).

(1) Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet PNUD-OMM, avec le concours des services hydrologiques et météorologiques burkinabés auxquels nous tenons à exprimer nos remerciements.

Nous avons tracé (fig. 4) la carte des hauteurs de pluie précipitée au cours de l'averse en utilisant la méthode de Thiessen (Remenieras, 1976). La structure de ces hauteurs est relativement complexe. On peut cependant constater que les régions où les précipitations sont maximales s'organisent grossièrement selon une direction est-ouest (traits pointillés) qui est approximativement celle du mouvement de la ligne de grains (fig. 2). Les précipitations les plus faibles sont enregistrées au sud, en bordure de la perturbation si on se réfère à la figure 2, mais aussi au centre du domaine étudié. Ces vallées sont également organisées selon une direction est-ouest.

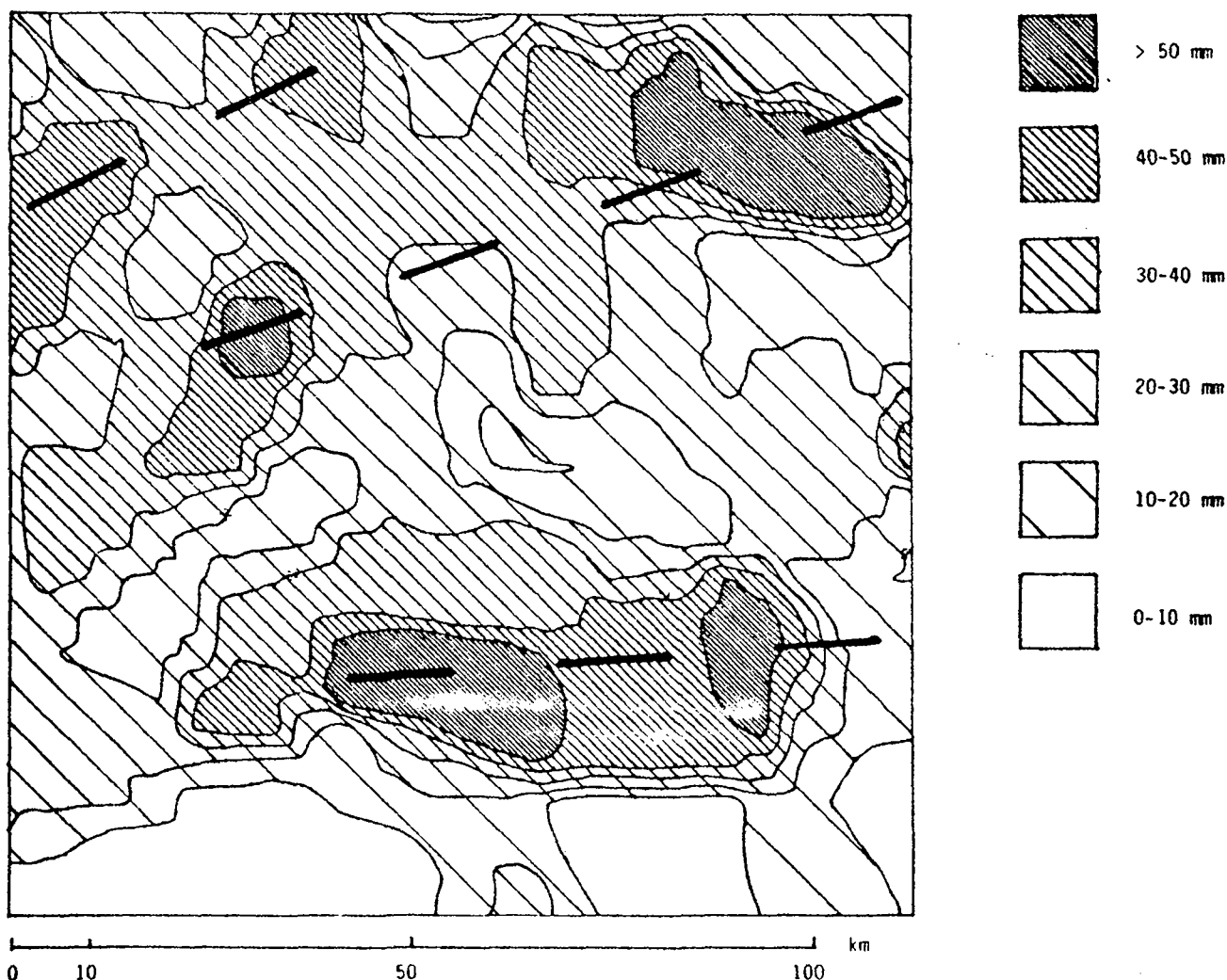


Figure 4. — ISOHYETES DE L'AVERSE OBSERVEE DURANT LA NUIT DU 12 AU 13 JUIN 1986 DANS LA REGION DE OUAGADOUGOU (Burkina-Faso), CALCULEES PAR LA METHODE DE THIESSEN A PARTIR DE 111 MESURES.

### 3. Etude synchronique des champs de températures et de précipitations

Nous avons également étudié, grâce aux données du canal infrarouge de Météosat 2 d'une part, grâce à nos observations au sol d'autre part, la propagation de la perturbation au-dessus du degré carré de Ouagadougou. Les éléments de cette étude sont rassemblés sur la figure 5, sur laquelle chaque ligne correspond à une heure donnée. Nous avons associé aux données satellitaires reçues à l'heure juste (par exemple 2 h. GMT pour la quatrième ligne) l'estimation de la zone au sol pour l'instant antérieur d'un quart d'heure, afin de tenir compte du temps écoulé entre l'observation par le satellite et la réception au sol.

Les différentes lignes des trois premières colonnes de la figure 5 représentent, du 12 juin 23 h 00 au 13 juin 7 h 00, pour chaque heure juste, la cartographie des zones froides observées par Météosat 2 dans le canal infrarouge, avec des seuils respectivement fixés à 50, 40, et 30 unités de compte radiométrique (u.c.r.). La température est une fonction croissante du compte radio-métrique, le seuil de 50 u.c.r. correspondant à une température voisine de  $-40^{\circ}\text{C}$ .

On constate, sachant que la perturbation se déplace d'est en ouest, que si le front de celle-ci est très net, sa dissipation est beaucoup plus floue, comme on peut particulièrement l'observer sur l'image de 4 h 00 traitée au seuil de 30 u.c.r.

La quatrième colonne représente, pour les heures correspondantes, la cartographie des surfaces où il pleut. Connaissant en chaque station de mesure l'heure du début et de la fin de l'averse nous savons si, à un instant donné, une station bénéficie ou non de l'averse. Pour chaque instant étudié les stations disponibles sont localisées sur les cartes de la cinquième colonne. La cartographie des zones pluvieuses est ensuite établie en attribuant aux différentes

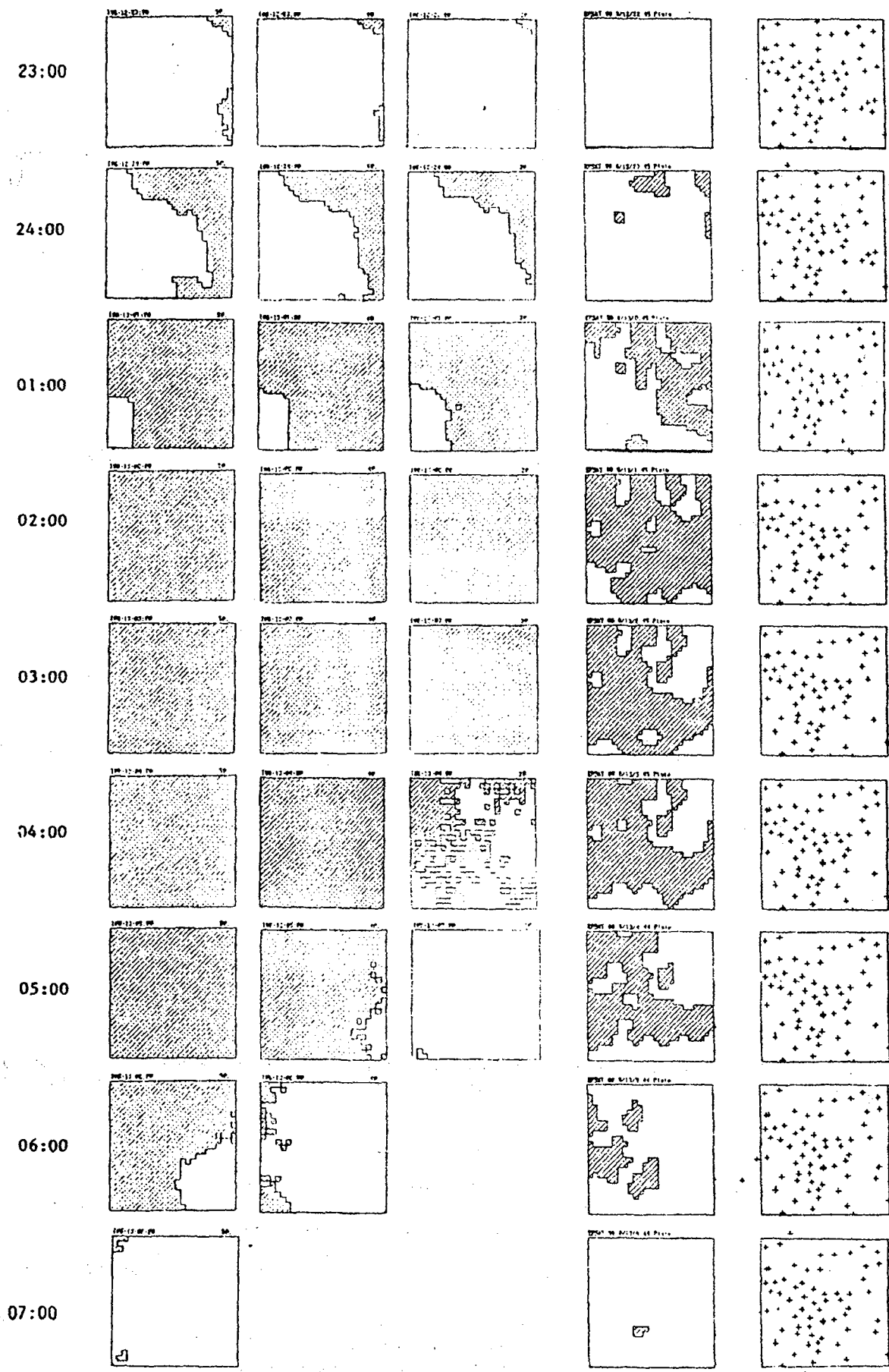


Figure 5. — AVERSE OBSERVEE DURANT LA NUIT DU 12 AU 13 JUI 1986 DANS LA REGION DE OUAGADOUGOU (Burkina-Faso) : Comparaison synchrone heure par heure, du 12 juin à 23 h 00 au 13 juin à 7 h 00 des données satellitaires et des données terrestres. Dans les trois premières colonnes sont cartographiées les surfaces froides observées par Météosat avec des seuils fixés respectivement à 50, 40 et 30 unités de compte radiométrique. On a figuré en quatrième colonne la cartographie des surfaces couvertes par l'averse estimée par la méthode de Thiessen à partir des points d'observation cartographiés en colonne cinq.

stations une zone d'influence selon la méthode de Thiessen, appliquée au maillage en pixels des images de Météosat 2. On constate que ces zones sont très complexes ; de petits noyaux adventices entourent un noyau principal présentant des lacunes. Cette structure, que l'on retrouve sur les images radars des zones précipitantes, évoque par son intermittence et son irrégularité, un objet fractal. Cette constatation a d'ailleurs déjà été réalisée et quantifiée dans différentes situations météorologiques. (Lovejoy, 1983 ; Lovjoy et Mandelbrot, 1985 ; Lovejoy et Schertzer, 1986). Certains éléments de structure se retrouvent parfois sur l'image satellitaire et sur la cartographie des zones précipitantes, (la région vide du nord-est de l'image au seuil de 30 u.c.r. et de l'estimation de la zone de pluie à 4 h 00 par exemple) mais il est évident que la seconde ne peut se déduire de la première bien que la pluie accompagne le passage du nuage froid.

#### 4. Etude diachronique des températures et des précipitations

Nous avons enfin étudié (fig. 6) l'évolution au cours du temps, pour les mailles ou pixels où nous disposons d'un pluviographe, du compte radiométrique mesuré par Météosat 2 et des précipitations.

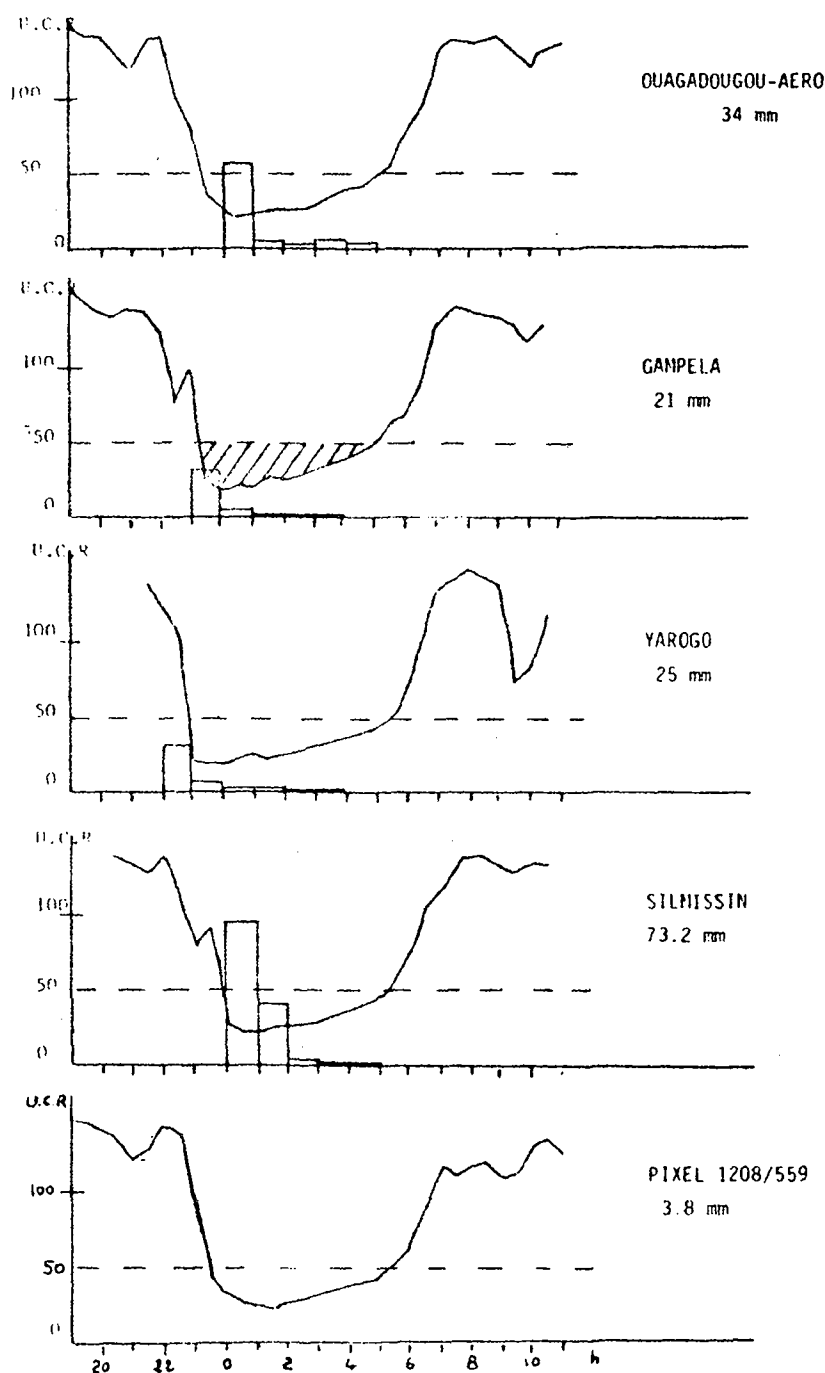


Figure 6. — AVERSE OBSERVEE DURANT LA NUIT DU 12 AU 13 JUI 1986 DANS LA REGION DE OUGADOUGOU (Burkina-Faso) : comparaison diachronique des données satellitaires et des données terrestres pour cinq pixels dont quatre associés à un poste pluviographique.

En ce qui concerne l'évolution de la température l'évolution est très comparable pour les différents pixels étudiés. Partant d'un niveau voisin de 150 u.c.r., on observe après quelques petites oscillations une chute brutale (en moins de deux heures) vers un niveau de l'ordre de 25 u.c.r. Cette chute peut être mise en relation avec le début de la pluie qui se poursuit tant que la température reste inférieure à environ 50 u.c.r. Pendant la durée de la pluie, ici de l'ordre de 6 heures, la température radiative apparente croît lentement. La croissance de cette dernière est ensuite plus rapide jusqu'à un niveau proche du niveau initial, mais elle présente des oscillations qui peuvent être importantes, et qui s'étalent sur quelques heures. Il faut noter que les courbes de température relatives aux différents pixels étudiés sont pratiquement superposables.

En ce qui concerne l'évolution des précipitations, il faut remarquer que leur intensité est maximale au début de l'averse et décroît exponentiellement, évoquant un hydrogramme de tarissement. Il s'agit d'ailleurs là d'un phénomène qui a été régulièrement observé sur la quasi totalité des enregistrements pluviographiques de la saison des pluies de 1986 (Djimdongarti, 1987). Malgré les différences de pluviométrie importantes, plus de 73 mm enregistrés à Yarogo au nord du degré carré contre 21 mm enregistrés à Gampela au centre du degré carré, il ne nous a pas été possible de relier ces différences à des caractéristiques des courbes de températures telles que minimum ou surface délimitée par la courbe et l'isotherme 50 u.c.r. (hachurée sur l'enregistrement relatif à Gampela). L'évolution thermique du pixel 1208-599, situé au sud-ouest du degré carré, où nous ne disposons pas de pluviographe mais où la pluviométrie estimée est de 3.8 mm, est elle-même superposable à celles des pixels beaucoup plus arrosés.

## 5. Conclusion

A l'issue de cette étude, corroborée par celles d'autres épisodes pluvieux de l'été 1986 effectuées dans les mêmes conditions, nous devons conclure que les seules données infrarouge locales de Météosat 2 sont insuffisantes pour réaliser une estimation satisfaisante des précipitations à l'échelle de temps et d'espace que nous avons adoptées. Il semble difficile d'aller à ce niveau au-delà d'un diagnostic sur la présence ou l'absence de précipitation au sol. Ce n'est qu'à l'échelle saisonnière et régionale que les seules données infrarouge locales de Météosat 2 permettent une estimation quantitative, dont l'intervalle de confiance reste cependant important (Lahuec et al. 1986). Il semble désormais que d'autres approches, fondées sur l'étude de la vie du système nuageux pluvigène, et, ou d'autres données de nature météorologique (eau précipitable, évaporation sous les nuages) telles que celles utilisées par Griffith (1987) mais sans doute aussi topographique et physiographique, devront être utilisées pour réaliser des estimations de hauteur d'eau précipitée convenables aux échelles de temps (quelques heures) et d'espace (quelques dizaines de km<sup>2</sup> que nous avons considérées ici.

## BIBLIOGRAPHIE

- AGRHYMET, 1986 — Bulletin agronoméorologique décadaire régional pour les pays du CILSS, 5/86, p. 11.
- DJIMDONGARTI R., 1987 — Etude au pas de temps horaire des pluviogrammes de la campagne Epsat 1986 dans la région de Ouagadougou (Burkina-Faso), Mémoire de DEA, Ecole des Mines de Paris, 117 pages.
- GRIFFITH C.G., 1987 — Comparaison of gauge and satellite rain estimates for the central United States during August 1979, *Journal of Geophysical Research*, 92, D8, pp 9551-9566.
- LAHUEC J.P., CARN M., GUILLOT B., 1986 — Convection et pluviométrie en Afrique de l'ouest. Bilan provisoire pour la saison 1986 : 1<sup>er</sup> mai-31 octobre, *Veille Climatique Satellitaire*, Lannion, 15, pp 19-23.
- LOVEJOY S., 1983 — La géométrie fractale des nuages et des régions de pluies, la houille blanche, 5/6, pp 431-436.
- LOVEJOY S., MANDELBROT B.B., 1985 — Fractal properties of rain and a fractal model, *Tellus*, 37A, pp 209-232.
- LOVEJOY S., SCHERTZER D., 1986 — Scale invariance, symmetries, fractals, and stochastic simulations of atmospheric phenomena, *Bull. of the american meteorological society*, 67, pp 21-32.
- RÉMENIERAS G., 1976 — L'hydrologie de l'ingénieur, Eyrolles, Paris, 456 p.

### Premières conclusions et perspectives d'avenir

Au terme d'une étude des rapports entre données satellitaires et données pluviométriques détaillées au sol, à différentes échelles de temps, il apparaît qu'à mésoéchelle spatiale (100 x 100 km) on puisse conclure :

- que l'isotherme - 40° C du sommet des cumulo - nimbus intertropicaux fournit bien la limite des zones pluviogènes. Grâce à Météosat II qui prend un cliché toutes les demi heures, les aires de pluie peuvent donc être suivies avec bonne précision en très léger différé.
- que le début de la pluie et son maximum d'intensité en un point donné correspond à une chute brutale de cette température du sommet des nuages.
- que cette température reste quasiment constante au cours de l'épisode pluvieux et qu'il n'y a pas de relation directe entre la hauteur de pluie tombée et cette température ou entre la hauteur et le volume du nuage.
- que la dynamique de la perturbation et en particulier son sens de déplacement est un facteur prédominant de la répartition et donc de la variabilité des hauteurs d'eau.

A ces conclusions issues directement de l'expérimentation menée en 1986 sur le degré - carré de Ouagadougou, nous pouvons ajouter les commentaires suivants :

- les champs pluviométriques à mésoéchelle résultant de lignes de grains sont de nature multifractale ce qui revient à dire que leurs structures spatiales présentent une invariance d'échelle.
- cette possibilité de description de la variabilité spatiale des épisodes pluvieux jointe à la notion d'anisotropie des champs pluviométriques (anisotropie due au fait que le sens de propagation de la perturbation impose une répartition orientée des pluies) nous paraît être un outil privilégié pour comprendre et donc prévoir, au moins qualitativement, la répartition des pluies (a).

---

(a) - HUBERT P. et J.P. CARBONNET (1988) - Utilisation de la géométrie fractale pour la caractérisation de la variabilité et de l'anisotropie des précipitations intertropicales. C.R. Acad. Sc., 1988 (à paraître).



- une expérimentation à plus grande échelle, celle des lignes de grains, devrait permettre d'aller plus loin dans la compréhension de cette variabilité. Certains paramètres au sol - relief, bilan radiatif (présence de forêt non dégradée) - pourraient d'autre part influencer la répartition des pluies.

IV. LISTE DES PARTICIPANTS A L'ATELIER N° 3

NOM	PRENOMS	ORGANISME ON INSTITUTION	ADRESSE
AG MOHAMED	Attaher	Opération Puits Mali	BP 106 Bamako
ALBERGEL	Jean	ORSTOM Sénégal	BP 1386 Dakar
BEIDOU	Bagnan	Direction Ressources en Eau, Niger	BP 257 Niamey
BERNERT	Guy	B.R.G.G.M. /Niger	Niamey
CARBONNEL	J. Pierre	C.N.R.S./Univ. Paris VI	Paris
CHAPPELIER	Dominique	Inst. de Géophysique	Lausanne Suisse
CHEIK	Abdel K.K.	Autorité Liptako Gourma	Ouagadougou B.F
CHOCHON	Claude	ETSHER	BP 504 Ouaga
CLAUDE	Jacques	ORSTOM France	BP 5045 Montpellier
CONGO	Tasséré	DEP/M. Eau Burkina Faso	BP 7025 Ouaga
DEH VILLAWOE	Mabey	BNRM Togo	BP 356 Lomé
DIALLO	Mamadou	ONFF/Bobo Dioulasso B.F	BP 7025 Ouaga
DIALLO	Sumaïla	I.G.B. Burkina Faso	BP 7054 Ouaga
DICHTL	Luis	UNDTCD/DGRH	Guinée Bissau
FRANCISCO	Fernandes	Ministère des Ressources Naturelles - Guinée B.	BP 399 Bissau
GALBANE	Hado	ONPF/Tenkodogo Burkina Faso	BP 7025 Ouaga
GASSITA	Serge	MERH Gabon	BP 1172 Libreville
GEADAH	Adib	FAO Projet BKF/87/001 Farako Ba Burkina Faso	Bobo Dioulasso
GENY	Pierre	Ministère Coopération France	20 rue Monsieur 75 700 Paris
GILLARD	Olivier	Direction Génie Rural	Bamako Mali
GNAO	Thierry	CECI (Centre Canadien d'Etudes et de Coopération Internationale)	BP 3440 Ouaga
GRENER	Fred	G.T.Z.	
GUNST	Reinont J.M.	IWACO - B.V. / B.F	BP 2523 Ouaga
HENRY	J. Luc	Géohydraulique-Sogreah	BP 172 X Ouaga
HODIN	Kossi	Dir. Hydraulique et Energie, Togo	BP 335 Ouaga
KAMARA	Muctarr S.	CRTO	BP 1762 Ouaga
KONENIN	Afoco	Conseil de l'Entente	
LACHAUD	J. Claude	Consultant Géophysique	Montpellier France

LAHAYE	J. Pierre	Ministère Coopération France	MACAC-Niamey Niger
LAMACHERE	J. Marie	ORSTOM Burkina Faso	BP 182 Ouaga
MARTIN	Alain	BRGM France	BP 6009 Orléans
MOURI	Maurice	SEEG Gabon	Libreville
MOUSSIE	Bernard	BRGM France	BP 6009 Orléans
MVOUMA	Fanstin	CRTO	BP 1762 Ouaga
OUATTARA	Bakary	OMVS	BP 3152 Dakar
OUEDRAOGO	Amadou	IGB Burkina Faso	BP 7054 Ouaga
OUEDRAOGO	Mamadou	ONPF/Koudougou	BP 25 Burkina Faso
OUEDRAOGO	Madi	ONPF/Fada N.G.	Burkina Faso
PAFADNAM	Seni	ONPF	BP 7025 B.F
PARE	Francis	I.G.B. Burkina Faso	BP 7054 Ouaga
PARNOT	Jacques	CRTO	BP 1762 Ouaga
POUYAUD	Bernard	Direction ORSTOM France	Paris
SAFAR ZITOUN	Mohamed	AAC/PCHIA	BP 102 Hussein Dey Alger
SANNE	Abdoulaye	I.G.B. Burkina Faso	BP 7054 Ouaga
SASMAYOUX	J. Pierre	D.N.H.E. du Mali	BP 1150 Bamako
SAVARY	Gérald M.	MRAIH - DRE, Niger	BP 257 Niamey
SEYNI	Salou	NIGELEC Niger	Niamey
SISSAKO	Mohamed	ASECNA	BP 3144 Dakar
STRUCKMEIER	Wilhelm	BGR / RFA	BP 510
TABANI	Luciano	AQUATER S.P.A. S. Lorenzo in Campo	153 HANNOVER
SOUBEIGA	J. Pierre	I.G.B. Burkina Faso	Itelie BP 7054 Ouaga
TESTOT-FERRY	Henry	FORAFRIQUE / B.F	BP 4611 Ouaga
TOE	Issa	Ministère Equipement/B.F	BP 7011 Ouaga
TYATON	Biton	IWACO-B.U. /B.F	BP 2523 Ouaga
TRIBOULET	J. Pierre	C.I.E.H.	BP 369 Ouaga
VINTER	J. Pierre	C.I.E.H.	BP 369 Ouaga
WANDAOGO	Adama R.	ONPF/Ouahigouya	BP 203
ZOMBRE	Jules	ONPF/Ouagadougou	BP 7025

## V. RECOMMANDATIONS ET RESOLUTIONS

La présentation des communications a été suivie de discussions techniques intéressants et enrichissantes.

A l'issue de ces débats, des recommandations à l'endroit des Etats membres et du CIEH ont été proposées par les participants à l'atelier.

Les recommandations et résolutions adoptées et prises par le 14e Conseil des Ministres du CIEH relativement aux domaines de la cartographie et de la Télédétection sont les suivantes :

Recommandation N°6/CIEH/1988

- relative à la collecte des données hydrogéologiques

Résolution N°6/CIEH/1988

- \* relative à la Cartographie hydrogéologique

Résolution N°7/CIEH/1988

- relative à la Coordination dans le domaine de la cartographie hydrogéologique

Résolution N°8/CIEH/1988

- relative à la formation liée à l'élaboration et à l'utilisation des cartes.

Résolution N°9/CIEH/1988

- relative à la Télédétection

Les textes de ces recommandations et résolutions sont reproduits ci-après.

RECOMMANDATION N°6/CIEH/1988

RELATIVE A LA COLLECTE DES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES

Le 14<sup>e</sup> conseil des Ministres du CIEH, réuni en session ordinaire du 16 au 18 février 1988 à Ouagadougou,

CONSIDERANT :

- la nécessité de disposer de toutes les données de terrain et des documents de synthèse pour l'élaboration de cartes hydrogéologiques ;
- la nécessité de mettre à la disposition des opérateurs d'hydraulique villageoise, et autres intervenants dans la connaissance et l'exploitation des eaux souterraines, toute l'information disponible au niveau national ;

RECOMMANDE AUX ETATS MEMBRES :

- de doter de moyens adéquats humains, matériels et financiers les services hydrométéorologiques et hydrogéologiques chargés de la collecte des données de terrain ;
- d'adopter des normes relatives à la constitution des fichiers de données en tenant compte des exigences d'homogénéité régionale ;
- d'adopter les mesures nécessaires, y compris les mesures réglementaires, pour obtenir la collaboration des opérations des programmes d'hydrauliques villageoise dans le rassemblement des données conformément aux normes ;
- de créer et/ou renforcer les structures nationales archivage réglementé de la documentation sur les ressources en eau.

Signé : Alfred NOMBRE

Ministre de l'Eau du  
BURKINA FASO

Président du 14<sup>e</sup> Conseil  
des Ministres du CIEH

RESOLUTION N° 6/CIEH/1988

RELATIVE A LA CARTOGRAPHIE HYDROGEOLOGIQUE

Le 14ème Conseil des Ministres du CIEH, réuni en session ordinaire du 16 au 18 février 1988 à Ouagadougou,

CONSIDERANT :

- l'importance de la connaissance des potentialités hydrogéologiques pour planifier et programmer l'exploitation des eaux souterraines ;
- la nécessité de fournir aux techniciens et aux décideurs locaux, nationaux et régionaux des documents d'aide à la décision adaptés à leurs besoins respectifs et facilement actualisables ;
- l'intérêt de la représentation cartographique particulièrement adaptée ;

INVITE LE C.I.E.H. :

- à mener des études conduisant à l'amélioration de la méthodologie d'élaboration des cartes hydrogéologiques par :
  - + l'identification des utilisateurs scientifiques et décideurs non spécialisés des cartes et des thèmes les concernant respectivement ;
  - + la coopération avec les institutions cartographiques responsables de l'élaboration des cartes topographiques de base ;
  - + la conception de référentiels pour la constitution de bases de données informatisées sur les points d'eau, incluant le choix des paramètres, des niveaux de saisie, des logiciels et des matériels ;
  - + la promotion des techniques de cartographie assistée par ordinateur.

Signé : Alfred NOMBRE

Ministre de l'Eau du BURKINA FASO  
Président du 14ème Conseil des  
Ministres du CIEH.

RESOLUTION N° 7/CIEH/1988

RELATIVE A LA COORDINATION DANS LE DOMAINE  
DE LA CARTOGRAPHIE HYDROGEOLOGIQUE

Le 14ème Conseil des Ministres du CIEH, réuni en session ordinaire du 16 au 18 février 1988 à Ouagadougou,

CONSIDERANT :

- la diversité des programmes en cours ou à venir portant sur l'établissement de cartes hydrogéologiques de base ou thématiques à l'échelle régionale ou nationale;
- la nécessité d'exploiter au mieux les ressources financières disponibles ;

MANDATE LE C.I.E.H. :

- pour constituer un groupe de travail des institutions impliquées dans la cartographie hydrogéologique en Afrique pour veiller à l'harmonisation des programmes.

Signé : Alfred NOMBRE

Ministre de l'Eau du BURKINA FASO  
Président du 14ème Conseil des  
Ministres du CIEH.

RESOLUTION N° 8/CIEH/1988

RELATIVE A LA FORMATION LIEE A L'ELABORATION  
ET A L'UTILISATION DES CARTES

Le 14ème Conseil des Ministres du CIEH, réuni en session ordinaire  
du 16 au 18 février 1988 à Ouagadougou,

CONSIDERANT :

- les besoins aigus en personnel spécialisé dans diverses disciplines liées à la cartographie hydrogéologique ;

INVITE LE C.I.E.H. :

à promouvoir les actions de formation de géophysiciens, de spécialistes en qualité des eaux, de documentalistes, d'utilisateurs de la micro-informatique tant sur le plan des logiciels que des matériels.

Signé : Alfred NOMBRE

Ministre de l'Eau du BURKINA FASO  
Président du 14ème Conseil des  
Ministres du CIEH.



RESOLUTION N° 9/CIEH/1988

RELATIVE A LA TELEDETECTION

Le 14ème Conseil des Ministres du CIEH, réuni en session ordinaire du 16 au 18 février 1988 à Ouagadougou,

CONSIDERANT :

- que la télédétection est un outil performant pour l'inventaire et le suivi de l'évolution des milieux physiques et humains ;
- que ses récents développements permettent d'envisager son utilisation croissante pour l'évaluation des ressources hydrogéologiques et l'implantation des ouvrages de captage, pour la connaissance de la répartition spatiale et temporelle des pluies et des écoulements de surface en zone tropicale ;

INVITE LE C.I.E.H. :

à porter un intérêt soutenu à la poursuite des études en cours pour l'application de la télédétection au domaine des ressources en eau, notamment en relation avec les bases de données et la cartographie.

Signé : Alfred NOMBRE

Ministre de l'Eau du BURKINA FASO  
Président du 14ème Conseil des  
Ministres du CIEH.