

RECHERCHES D'EAUX SOUTERRAINES DES SPECIALISTES HONGROIS DANS UN PAYS SEMIARIDE TROPICAL

(République du Mali, Afrique de l'Ouest, 1962–1972)

Par:

GÁBOR F. LÁNG

géologue
collaborateur de l'Institut
Géologique de Hongrie

SPECIAL PAPERS
BUDAPEST, 1974/1
INVESTIGATIONS IN FOREIGN COUNTRIES: METHODS AND APPLICATIONS

Traduction révisée

par

E. DUDICH

Redacteur technique

D. SIMONYI

Responsable éditeur

J. KONDA

Directeur du Service géologique national de Hongrie

I. PREFACE

Le Mali (ex-Soudan Français) couvrant un territoire deux fois plus grand que la France et 12 fois plus vaste que la Hongrie (sa superficie étant 1,204.000 km²), occupe la zone centrale de la partie occidentale de l'Afrique.

Ce pays typiquement continental, relativement isolé, sous-peuplé (la densité moyenne de la population est de l'ordre de 4 habitants au km²), à composition ethnographique très hétérogène, *offre d'excellentes possibilités aux chercheurs*, notamment dans les domaines historiques, ethnographiques, sociologiques, géographiques et pas au dernier lieu géologiques. En plus, il faut rendre compte, que l'état actuel des connaissances n'ait guère dépassé sa première phase de reconnaissance, surtout en ce qui concerne les sciences de la terre.

Les premières traces écrites concernant les états fleurissants de cette partie de l'Afrique datent de l'époque des invasions arabes (VII^e siècle après J. C.), puis marocaines (pénétration des Almoravides*), lesquelles signalaient l'existence des empires féodaux de Ghana, Mali et celui de Gao.

Ces faits historiques signifient, que cette zone climatique (soudanaise et sahélienne) fussent favorables au moyen-âge pour que ces agglomérations puissent prendre un sens de développement particulier, tout à fait différentes des civilisations européennes.

Le passé et les traditions, modifiés par l'influence française, surtout par la pénétration du modèle social européen et la technique moderne, constituent les matériels-premiers du Mali actuel.

Due à sa situation continentale déjà mentionnée, les ressources exploitables du pays sont médiocres, ce sont avant tout l'agriculture et l'élevage lesquels peuvent améliorer le rendement national (pourtant très bas pour l'instant).

Voyant ce fait, *l'augmentation du nombre et de la qualité des points d'eau devenait une nécessité absolue*, surtout au cours des dernières années exceptionnellement déficitaires au point de vue précipitation, sans parler des conditions sanitaires et alimentaires: problèmes dépendant intégralement de l'eau. Ces années „noires" démontraient, que les efforts précédents fussent insuffisants: dans le Sahel (zone intermédiaire entre le Sahara et le Soudan), *dans certaines régions, plus que la moitié du bétail a été perdue par manque d'eau* et de pâturage, et c'est la famine qui menace actuellement ce pays dévasté.

*mot provenant d'un terme arabe; „al morabit" - monastère fortifié, signifiant le mouvement islamique d'un groupe berbère d'ABDALLAH BEN YACINE.



Cette situation critique (rare, mais connue dans l'histoire), attire l'attention de nouveau sur l'importance des recherches de base hydrogéologiques bien fondées. Bien que ces recherches ne fussent pas négligées dans le passé, mais il aurait fallu – et il faut dans l'avenir – les considérer, comme l'activité la plus importante des géologues travaillant au pays, sans parler de l'exécution des ouvrages d'exploitation d'eau.

La rentabilité de l'exploitation des ressources minières connues est également liée aux problèmes d'eau (sur la majeure partie du territoire malien à la mise en valeur des eaux souterraines). Ainsi ce programme doit s'orienter vers *l'alimentation en eau*:

- des agglomérations,
- des zones d'élevage,
- des voies de transhumance (pistes caravanières et de la migration du bétail), et
- des zones à ressources minières potentielles, exploitables dans l'avenir.

II. INTRODUCTION

La naissance du Bureau Minier du Mali en 1961 ouvra le chemin aux coopérants hongrois dans le domaine des sciences de la terre, dont les principes générales ont été accordées au cours d'un entretien inter-états. Cet accord précisa les sens de l'aide bilatérale dans le but d'améliorer les conditions de développement de ce nouveau pays de l'Afrique Occidentale.

Pendant la visite à Bamako de DR. L. REICH, géologue-en-chef de la coopération hongroise à l'époque en Guinée, le Directeur Général du Bureau Minier du Mali souhaitait, que l'activité des experts commence dans le domaine hydrogéologique, *afin de découvrir et de mettre en valeur des nouvelles ressources en eaux souterraines* dans la zone saharienne et sahélienne du pays.

Un grand nombre de bétail représentant une très grande valeur nationale, l'eau et pâturage en abondance pendant l'hivernage bien courte (juillet—septembre), pénurie d'eau au cours de la longue saison sèche (octobre—juin) étaient les arguments et les facteurs fondamentaux lesquels justifiaient de créer un service hydrogéologique national solide et d'élaborer un programme de l'hydraulique pastorale et rurale.

La présence des spécialistes hongrois (commencée en juillet 1962, terminée en décembre 1972) a été caractérisée par le nombre peu élevé des experts, mais qui travaillaient au pays pendant plusieurs années parmi des conditions particulièrement difficiles, dans les zones les plus arides et éloignées. D'autre part à l'exception d'un essai d'importation des pompes à manège, ils remplissaient leurs fonctions avec les matériels de prospection très variés, importés d'autres pays.

Voici quelque chiffres lesquels peuvent donner des idées préliminaires concernant le **volume des travaux effectués**.

Au cours des 10 ans passés il y avait 16 spécialistes hongrois République du Mali, dont 8 cadres supérieures (en majorité des géologues) et 8 cadres moyens (surtout des techniciens-foreurs), parmi lesquels 14 remplissaient leurs fonctions dans un cadre bilatéral, 2 dans le cadre du Programme des Nations Unies pour le Développement. Ces experts passaient de 2 à 4 ans au pays, période suffisante pour s'adopter aux conditions climatiques, de se familiariser avec les grands traits géologiques et géographiques des terrains d'étude et de travailler à un rendement relativement satisfaisant.

D'après nos calculs, *le nombre total des géologues-mois* (ou ingénieurs-mois) *passés sur le terrain s'élève à 97, celui des techniciens à 104 mois*, soient 201 mois. Ce chiffre indique, que *la majeure partie d'activité des experts s'est déroulée sur le terrain*, pendant

des longues missions de reconnaissance ou de forage (l'itinéraire parcourue au cours des reconnaissances de type différent est de l'ordre de 200.000 km, la superficie couverte par de levés en diverses échelles est 140.000 km², représentant les 10 % env. de la superficie totale du pays).

En 1964 le genre d'activité, ainsi que l'organisation et les buts principaux du Bureau Minier du Mali aient changé, ayant été devenu une société d'état, nommée SO.NA.R.E.M. (Société Nationale de Recherches et d'Exploitations Minières). Ainsi le type de travail de nos experts s'est modifié; à côté des missions de forage d'eau (lesquelles restaient les campagnes les plus importantes), les levés géologiques et hydrogéologiques commençaient à représenter une proportion considérable, mais toujours dans un but concret (études hydrogéologiques d'une zone ou localité déterminée, prospection minière locale, estimation de ressources, etc.).

A partir de 1969, le cadre du Programme des Nations Unies pour le Développement (P.N.U.D.) permettait d'effectuer des études géologiques, hydrogéologiques et géomorphologiques (appliquées ou générales) plus poussées des régions naturelles entières.

Le tableau d'assemblage ci-dessous permet d'avoir des idées plus concrètes en ce qui concerne le genre d'activité des spécialistes hongrois au Mali:

1. HYDROGEOLOGIE

a) Générale (classique)

- études stratigraphiques et structurales complémentaires
- inventaire des points d'eau existants
- essais de détermination des caractéristiques des nappes (cartes de l'épaisseur et du toit des aquifères, cartes ou esquisses piésumétriques, celles d'isorésistivité des eaux, etc).
La figure n° 6 démontre un cas, celui de Ni oro du Sa hel (alimentation en eau de la ville)
- mise au point des cartes hydrogéologiques générales.

b) Quantitative

- estimation de ressources statiques et dynamiques
- essais d'établissement des bilans (en se basant sur les ouvrages précédents et les données hydrométéorologiques).

c) Appliquée

- calcul des besoins en eau (de la population et du bétail)
- établissement de bilans besoins/possibilités
- implantation des nouveaux points d'eau
- réalisation et exploitation des ouvrages (forages de recherche et d'exploitation d'eau, pompages d'essai)
- documentation des ouvrages et des tests effectués. Exploitation des résultats.

d) Synthétique

- rassemblement des données anciennes et de nouveaux résultats
- modification du modèle hydrogéologique établi précédemment
- conclusions finales.

2. GEOLOGIE

- a) Générale: levés géologiques en échelles différentes (1/10.000-1/500.000, voir deux exemples - figures n° 2 et 3), suivant les normes internationales. Travaux essentiellement méthodologiques.

b) *Appliquée*: surtout dans le domaine minier (prospection des évaporites liées aux „s e b k h a s” en zone saharienne, étude des pegmatites lithifères des granites é b u r n é e n s – 1.800–2.000 M.A. –, étude de la minéralisation du cortège doléritique h e r c y n i e n, prospection des gîtes stratiformes dans la zone sahélienne. Secondairement et occasionnellement études géotechniques).

3. GEOMORPHOLOGIE

a) *Générale*: dans le but de trouver des méthodes adéquates pour les zones d'étude sahariennes et sahéliennes (désertiques et subdésertiques), présentation des cartes en échelles différentes (voir exemple de 2 cartes géomorphologiques générales – figures n° 4 et 5).

b) *Appliquée*: dans le domaine hydrographique, hydrogéologique et minier.

4. AIDE TECHNIQUE

a) *Réalisation des forages* de recherche et d'exploitation d'eau (conduite des chantiers et des missions de tel genre).

b) En correspondance avec le programme de la mise en valeur des forages d'exploitation d'eau, *montage des pompes à manège* dans les zones d'élevage principales (au Nord de la Boucle du Niger).

En ce qui concerne les **résultats concrets**, sans parler d'une trentaine de cartes achevées à genres différents, le nombre et la nature des ouvrages effectués étaient les suivants au cours des dix ans de coopération:

176 forages représentant 5.445 mètres forés, dont

48 forages d'eau (3.950 m), parmi lesquels 33 à résultats positifs (24 sont exploitables)

8 forages de prospection minière (320 m)

10 sondages géotechniques (175 m)

100 sondages faits à la tarière à main (1.000 m. env., dans un but hydrogéologique ou minier)

Le nombre des pompes montées est de l'ordre de 10 (installations nécessitant des travaux de longue durée, à cause de la position généralement basse du niveau statique des nappes).

Les **zones d'étude** s'étendent dans les régions arides septentrionales et semiarides du pays, comme elles sont représentées sur la **figure n° 1**:

a) *Terrains d'étude dans la région saharienne*

– le Bassin de Taoudennit (2.200 km de la capitale)

– l'Azaouad (faisant partie du „Majâbat al-Koubrâ” de TH. MONOD, de 1.500 à 1.800 km de Bamako)

b) *Terrains étudiés dans la zone sahélienne*

– la partie Sud de l'Azaouad

– les périmètres du Lac Faguibine

– le Vallée du Tilemsi (au Nord de G.a.o, 2.000 km de Bamako)

– la zone d'Ansongo (1.800 km de la capitale)

– le Sahel str. (de 400 à 800 km au N et au NW de Bamako)

– la Plaine du Gondo (région naturelle s'étendant à la frontière voltaïque, de 600 à 1.000 km de Bamako).

Il est à mentionner l'activité d'une mission minière dans la zone soudanaise (région de Bougouni, au Sud de Bamako).

Les travaux cités nécessitaient des préparatifs minutieux des missions, notamment en ce qui concernait le choix du matériel adéquat et du personnel, l'assurance d'un approvisionnement parfait en carburants, en eau potable et en vivres des campagnes.

Les difficultés provenant des grandes distances des bases de ravitaillement et de la vie saharienne nous obligeaient d'élaborer des méthodes de conduite sévères, afin de pouvoir tenir en main l'énorme matériel (parfois plus que 10 véhicules, des sondeuses, des machines auxiliaires etc.) et le personnel souvent très nombreux (plus que 40 personnes dans le cas d'une mission saharienne p.e.).

Au cours des campagnes et de l'interprétation des résultats il fallait toujours tenir compte des moyens réduits lesquels nécessitaient de trouver des solutions artisanales.

III. GENERALITES CHOISIES

1. Climat

Déterminé par deux régimes de vent appartenant au système d'alisé (actionné par la position solaire relative) et par la situation géographique (latitude), *le climat du pays varie de hyperaride saharien à humide tropical*. Il est caractérisé par une seule saison de pluies (hivernage de juillet à octobre, dont la durée et l'intensité dépendent de la latitude géographique).

Il sera présenté ci-dessous un résumé sommaire court des différents facteurs climatiques agissant sur la végétation, la faune, la vie humaine, le bilan hydraulique et sur les processus d'altération des roches différentes:

Température

- Les *valeurs moyennes annuelles* varient de 25 à 29 C° avec deux maximas (l'un dans la Boucle du Niger, l'autre dans la région de Kayes).
- Les *valeurs moyennes mensuelles* montrent deux maximas (principal en avril-juin 34-36 C°, secondaire en octobre 30-32 C°) et deux minimas (principal en janvier 18-25 C°, secondaire en août 26-28 C°).
- Les *variations journalières* de la température sont considérables au cours de la saison sèche ($\frac{T_x}{T_n} = 35/15 - 30/20$ C°), moins contrastées en hivernage (31/25 C°).
- Les *maximas et minimas absolus* ont été mesurés dans la zone saharienne et présaharienne (49 C° dans la Vallée du Tilemsi en mars 1963, +1 C° à Taoudennit en décembre 1964).

Humidité relative. Moins que 30 % pendant 8-10 mois au Nord, 5-8 mois au Sud. En hivernage, dans la capitale, plus que 90 % pendant 2 mois (août-septembre).

Évaporation, évapotranspiration.

- *L'évaporation des surfaces d'eau libres* varie de 700 à 5.000 mm/an, dépendant de la situation géographique (mesurée en bac ou à l'aide de la méthode „piche”).
- *L'évapotranspiration potentielle* (ETP) a été calculée avec la méthode de TURC, à une approximation bien discutable.

Précipitation. Elle varie de moins que 5 mm (Taoudennit) à 1.500 mm/an (Sikasso, au Sud). Les isohyètes montrent une zonalité nette, orientée dans la direction WNW - ESE, à l'exception de la région de l'Adrar des Iforas (massif montagneux).

Les maximas sont mesurés en août, les minimas en décembre-janvier.

L'intensité des pluies ne dépasse que dans les 10-15 % des cas la valeur de 0,5 mm/minute (d'après DUBIEF).

Zones climatiques. Elles peuvent être déterminées d'après la formule de R. CAPOT-REY (notion de la *pluvio-efficacité*). Ainsi il est possible de délimiter les zones suivantes (orientées généralement dans la direction remarquée ci-dessus):

Climat	Précipitation (mm/an)	Pluvio-efficacité (P _e)	Végétation
Hyperaride saharien	rare, sinon néante	< 1	néante ou sporadique
Sud-saharien	irrégulière	1- 4	couverture discontinue des graminæ
Présaharien	50- 100	4- 5	couverture continue des graminæ
Nord-sahélien	100- 300	5- 10	graminæ à acacias
Sud-sahélien	300- 600	10- 15	steppe arbustive-herbeuse
Nord-soudanais	600-1.000	15- 50	savanne arbustive-herbeuse
Sud-soudanais	1.000-1.500	50-100	forêt „claire”
Humide, tropical	> 1.500	> 100	forêt ombrophile

Bilan hydraulique

- *L'infiltration directe* est négligeable dans tout le pays (au Nord à cause de la faible pluviométrie, au Sud: fait causé par la couverture épaisse des sols ferrallitiques divers). Il a été constaté, que le bilan proposé par TURC (Infiltration = P_i - ETP) donne des valeurs fausses, à l'exception de certaines zones dunaires applaties, où la règle de KEEN est applicable.
- *L'infiltration directe* partant des ruissellements et des fleuves joue un rôle très important dans le domaine de l'alimentation des nappes souterraines. Des mesures ou des calculs systématiques n'ont pas été effectués.

2. Voies de communication

- *Voies ferrées.* Pour l'instant (fin 1972) il n'existe que le seul chemin de fer „Dakar-Niger” à voie étroite, 1.400 km de long, reliant le bord atlantique à Koulikoro (port de Bamako).

- *Routes.* 1.500 km de route goudronnée env., construite en majorité au cours des dernières années, le reste étant des pistes latéritiques ou sablonneuses, impraticables en hivernage. La liaison goudronnée Abidjan-Bamako (très importante dans l'économie du pays) est en voie d'achèvement.

- *Navigation.* Le fleuve Niger n'est navigable que pendant 4 à 6 mois par an, entre Koulikoro et Gao (1.300 km env.), fait causé par les grandes différences de niveau des crues et celui des étiages, d'autre part par les cascades de Sotuba (en aval de Bamako) et d'Ansongo-Labbezenga.

- *Liaisons aériennes.* L'aéroport de Bamako, malgré qu'il soit bien placé au centre de l'Afrique Occidentale, ne peut pas recevoir les grandes appareils modernes (cargos p.e.). Le nouvel aéroport, hors de la ville, est déjà presque achevé. Autrement aux grands centres administratifs, il existe des pistes (goudronnées ou latéritiques) pour la liaison aérienne interne.

IV. GÉOGRAPHIE PHYSIQUE

1. Réseau hydrographique

Le territoire malien peut être divisé en 4 bassins versants principaux :

- **NIGER** (30 % env. de la superficie du pays)
- **SENEGAL** (15 % env.)
- **VOLTA** (2 % env.)
- **ZONES MAL DRAINÉES** des dépressions Sud-sahariennes (53 % env.).

Le système du fleuve **NIGER** joue un rôle déterminant dans l'économie du pays, étant le troisième fleuve de l'Afrique par ordre d'importance. Ses *données hydrauliques principales à l'embouchure* (Nigéria) sont rassemblées ci-dessous :

- longueur totale: 4.184 km
- superficie totale du bassin versant: 2,092.000 km²
- débit moyen: 12.000 m³/sec.
- moyen des débits aux étiages: 6.000 m³/sec.
- moyen des débits aux crues: 25.000 m³/sec.

Les grands traits du réseau hydrographique du fleuve ont été préformés au cours des différenciations tectoniques du Mio – Pliocène, modifiés par les mouvements néo-tectoniques du Quaternaire. Il est à noter la fameuse capture du Delta Intérieur: ayant été une zone lacustre, sans rapport apparent avec le bas-Niger, jusqu'au Holocène inférieur (dernière pluvieuse, correspondante à l'ère néolithique). Les conséquences économiques (Office du Niger: mise en valeur des anciens cours d'eau fossils, irrigation) et hydrogéologiques (dépôts fluviodeltaïques aquifères dans l'Azaoûd, 500 km au Nord du fleuve actuel) marquent l'importance de cette capture extraordinaire.

Le **SENEGAL**, moins important dans l'économie du pays par rapport au Niger, est le confluent de trois fleuves, lesquels prennent leurs sources sur le Plateau Mandingue (région de Bamako): ceux de Baoulé, le Bakoy et le Bafing. Sa longueur totale (à Saint-Louis) est 1.689 km, la superficie du bassin versant et le débit moyen étant 441.000 km² et 500–600 m³/sec.

Le rôle de la **VOLTA NOIRE** est négligeable au Mali, seule, la partie méridionale de la Plaine du Gondo (pays dogon, zone frontalière voltaïque) est à mentionner, particulièrement le Sourou. C'est une vallée fossile de la dernière pluvieuse (holocène): périodiquement inondée pendant les crues de la Volta Noire, mais aux décrues elle est sèche.

De 1969 à 1972 les cours d'eau fossils de la zone climatique sahélienne ont été étudiés en détail (géologie du Quaternaire, géomorphologie, géophysique, forages, etc.), afin de voir leurs possibilités d'aménagement et de découvrir des „u n d e r f l o w s” (travaux de G. LANG et MME. E. LANG, spécialistes hongrois et de M. BRO, géophysicien de l'équipe des Nations Unies).

Les problèmes des **ZONES MAL DRAINÉES** n'ont pas été résolus jusqu' à présent, les faits connus et les questions fondamentales sont exposés ci-dessous:

- la formation des dépressions sahariennes et présahariennes date du Mio - Pliocène et du Quaternaire (le Hodh mauritanien, dont une partie se situe au Mali et la dépression de Taoudennit)
- chaque dépression à altitude absolue relativement basse (120-150 m) se trouve en zone aride à faible pluviosité (somon nulle)
- plusieurs oueds temporaires se dirigent vers le Nord, pour se perdre par infiltration et évaporation
- le bilan hydraulique est inconnu par manque de stations météorologiques et de mesures
- la relation entre les nappes d'eau souterraines et les ruisseaux cités n'a pas été étudiée.

Malheureusement dans le domaine de l'hydraulique superficielle et souterraine, malgré que ces bassins (dépressions) cités soient des excellents terrains d'étude et leur partie Sud soit importante au point de vue élevage, aucun projet n'a pas encore été envisagé.

2. Régions naturelles

Déterminées par les facteurs géologiques, orographiques, hydrographiques et climatiques, *il est possible de distinguer 10 grandes régions naturelles au Mali:*

Région naturelle	Climat	Aspect général
I. Bassin de Taoudennit	hyperaride saharien	région à substratum paléozoïque, couverte par les dépôts sahariens du Quaternaire (zone d'action hongroise)
II. Azaouad	Sud-saharien et Nord-sahélien	substratum du Précambrien supérieur et du Paléozoïque, entièrement couvert par les dépôts du Mio - Pliocène et du Quaternaire. Zone d'étude importante de nos missions
III. Adrar des Iforas	item	faisant partie du Massif Central Saharien, terrain précambrien cristallin à aspect montagneux
IV. Bassin des Ioullemmedènes	Nord- et Sud-sahélien	plaine s'étendant en majeure partie au Niger, moins ensablée. Bassin du Mésozoïque continental, du Crétacé-Eocène marin et du Mio - Pliocène continental
V. Boucle du Niger (Gourma)	sahélien	bassin de subsidence du Précambrien supérieur (sédimentaire), à peine ensablé.

Les régions naturelles citées sont sous-peuplées sinon inhabitées (Bassin de Taoudennit p.e.): la zone présaharienne et Nord-sahélienne étant le terrain du grand nomadisme des tribus touareg et maures (arabo-berbères), à l'exception les bords du fleuve Niger (population songhai, bozo et somono). Les régions suivantes sont peuplées par les sédentaires (cultivateurs):

VI. <i>Plaine du Gondo</i>	sahélien-soudanais	bassin des dépôts fluvio-lacustres du Mio-Pliocène (Continental terminal), peuplé par les dogons (cultivateurs) et les peulhs. Zone d'étude principale en 1971/72 (équipe de l'O.N.U.).
VII. <i>Dépression du Hodh</i>	sahélien	la majeure partie étant en Mauritanie, le substratum cambrien (argilites) est partiellement masqué par des cordons dunaires (fixés). C'est le „Sahel” s. str. ayant été l'objet principal des études hydrogéologiques en 1969/70 (équipe de l'O.N.U., avec la participation des experts hongrois)
VIII. <i>Delta Intérieur du Niger (nommé „Macina”)</i>	Sud-sahélien	territoire inondé pendant les crues, zone principal de la pêche. Elevage et agriculture rudimentaire importants (population peulh, bozo, somono et songhai)
IX. <i>Plateaux gréseux</i>	soudanais	paysage à plates-formes tabulaires constituées des „grès horizontaux”, caractérisant la majeure partie de l'Ouest-malien
X. <i>Terrains cristallins méridionaux</i>	Sud-soudanais	zone précambrienne (pénéplaine cristalline) a manteau épais des sols ferralitiques, peuplée par les tribus bambara, sénéfou et mossi.

3. Géomorphologie

De 1969 à 1972 MME. E. LÁNG (collaboratrice de l'Institut Géographique de l'Académie des Sciences de Hongrie) avait la possibilité d'étudier les processus morphogénétiques de la région Sud-saharienne (Bassin de Taoudennit) et sahélienne (le Sahel proprement dit et la Plaine du Gondo): *Le but de ses travaux était essentiellement méthodologique* (levés en échelle différentes), *puis d'application* dans les domaines différents.

Au Sahara Ouest-méridional l'auteur distingua les groupes morphogénétiques suivants (voir exemple du Bassin Quaternaire de Taoudennit, figure n° 4):

I. Formes de dénudation et de pédimentation

- a) *Résidus des plate-formes anciennes* (buttes-témoins en position élevée, „g a r a t s”)
- b) *Surfaces en position intermédiaire* (généralement silicifiées: plaines tabulaires constituées de roches carbonatées, surfaces hammadiennes, cuestas)
- c) *Piedmonts*

II. Formes structurales (secondaires), taillées par la dénudation sélective, imitant des formes primaires (différences lithologiques, mouvements néo-tectoniques etc.):

- *filons de roches magmatiques* (en général des dolérites, formes positives ou négatives, „a g a t o r s”)
- *dykes des roches subvolcaniques* diverses („g l e i b s”)
- *sills de dolérite formant des cuestas*
- *failles néo-tectoniques.*

L'épaisseur de la série sédimentaire encaissante, dénudée, doit être de l'ordre de 1.000 à 2.000 mètres.

III. Formes d'accumulation

1. Bassins

- a) *dépressions d'origine tectonique de l'intérêt continental* (zones d'anomalie isostatique négatives), pe le Tanezrouft ou le Bassin de Taoudennit s. str.

- b) Bassins ou „grabens” tectoniques d’origine récente ou subrécente
- c) bassins de deflation (zones interdunaires ou terrains exposés au vent prédominant „Tayerts”)
- d) fonds de lac ou de lits de fleuve anciens, exhumés par la déflation

2. *Formes éoliennes*

- a) L’origine du sable éolien est discutée depuis longtemps. Il semble, que la sable dunaire soit un dépôt spécial, particulier, étant indépendant de la roche-mère originelle (produit uniforme de la déflation saharienne)
- b) Classification proposée des formes éoliennes

A. *Formes élémentaires*

- accumulation de sable à l’abri des obstacles (naturelles ou artificielles)
- ondulation de sable (perpendiculaire à la direction du vent dominant, forme „primitive” de départ des accumulations citées ci-dessous)
- lentilles de sable
- dos de baleine
- barkhanes

Ces formes se développent successivement dans le temps, si l’énergie de transport du vent a un caractère de „cours inférieur”, donnant naissance postérieurement aux formes complexes.

B. *Formes complexes („ergs”)*

- a) taillées par une seule direction de vent
 - dunes longitudinales
 - dunes transversales
- b) formées par deux directions de vent prédominant
 - „ergs” constitués de dunes longitudinales et transversale („aklès” de TH. MONOD)
 - barkhanes jumellées
 - dunes longitudinales dissymétriques, de très grande longueur et d’amplitude (surtout dans la zone sahélienne: dunes longitudinales fixées). Formes fossiles.

IV. *Formes hydro-éoliennes*

- a) Oueds sahariens (ensablés pendant leur période inactive)
- b) cônes de déjection des torrents
- c) „ergs”-résidus des cônes de déjection, ayant été exposés à la déflation.

Dans le Sahel la précipitation est déjà régulière, ainsi, la décomposition chimique prend une importance de plus en plus grande vers le Sud. Ces facteurs, c’est à dire l’altération physique et chimique agissent alternativement due à la longue saison sèche.

Il était possible d’y distinguer des plates-formes en position différente, témoignant les **balancements climatiques du Quaternaire** (identifiables jusqu’au Riss – Würmien, et de les lier aux terrasses du système Niger et celui du Sénégal. Cette remarque a des conséquences économiques importantes (prospection des bauxites latéritiques, mise en valeur des anciens cours d’eau, recherche des placer etc.).

Actuellement c’est l’érosion linéaire qui est le facteur agissant prédominant, en ce qui concerne la dénudation du relief, le transport sur les piedmonts et la sédimentation dans les bassins („playas”).

La figure n° 5 déjà citée à l’introduction démontre les différentes formes cartographiées par MME. E. LANG dans le Sahel s. str.

V. APERÇU GEOLOGIQUE

La majeure partie du territoire malien s'intègre dans le cadre du géosynéclyse de Taoudénit s.l.; un des plus grands bassins sédimentaires du monde. Le cadre du bassin et le substratum sont constitués des roches précambriennes cristallines du craton de l'Afrique Occidentale.

La cratogénèse s'est déroulée en plusieurs phases: cas classique et typique de l'évolution d'une plaque (ou plutôt d'un continent) rigide. Ce craton conservait – relativement et dans certains sens – sa *mobilité*, ayant réagi d'une manière tardive et différente aux grandes révolutions structurales.

Les mouvements tectoniques éburnéens (datés de 1.800 à 2.000 M.A.) ont été les dernières phases de manifestation d'un cycle orogénique complet et proprement dit (formation de l'archéo-craton): plissements à métamorphisme régional, magmatisme pré-, syn- et postorogénique. Depuis cette époque la plate-forme précambrienne déjà rigide ou relativement consolidée n'a subi aucune sédimentation de type géosynclinal et de l'orogénèse s. str. (formation du continent Gondwana).

Les roches cristallines liées à ce processus éburnéen – malgré que leur âge apparent soit dans certains cas beaucoup plus jeune à cause de la sensibilité de certains minéraux aux métamorphismes locaux (il s'agit particulièrement de la biotite dans le cas des déterminations de l'âge absolu) – se montrent un caractère commun. Elles *s'affleurent* actuellement dans l'Adrar des Iforas, dans le massif cristallin Ivoiro-Voltaïque, dans le Massif Guinéen, dans les „Mauritanides” (série „rajeunie”) et sur la Dorsale des Reguibats, étant cette dernière la partie la plus consolidée et le moins touchée par les processus postérieurs.

Après une longue période de pénéplanisation, il y a 1.000 M.A. env. (âge absolu, publié par R. REICHELDT), les zones relativement mobiles de la plate-forme (gondwanienne), à cause de mouvements de dilatation, subissaient une différenciation marquée du relief. Par conséquence des vastes bassins de subsidence orientés dans la direction ENE–WSW donnaient lieu à une *transgression générale*. La sédimentation marine de cette épisode déroulée aux *zones littorales* (talus épicontinental -fraction détritique grossière), aux *seuils* (sédiments récifaux) et dans les *bassins* (fraction fine) était typiquement intracratonienne. Les roches sédimentaires représentant cette série sont en général homogènes: des grès à épaisseur réduite aux *zones littorales* et des *argilites épaisses* (3.000–4.000 m) dans les *bassins* de subsidence.

Vers 580–600 M.A. (à la fin du Précambrien) une *tectogenèse „cassante aux plissements modérés”* soulevait de nouveau la plate-forme (processus étudié également par R. REICHELTL), suivie d'une nouvelle pénéplanisation à glaciation (sédiments tillitiques de l'Eocambrien). Comme cette tectogenèse porta des modifications à l'aspect général du Gondwana (nouvelle consolidation, déplacement et réduction de l'importance des zones mobiles, injection des granites biotitiques tardifs), il est préférable de le nommer „paléocraton”.

L'évolution du paléocraton continuait au début du Cambrien: dans la zone centrale et septentrionale du bassin sédimentaire une subsidence à l'importance réduite par rapport à celle du Précambrien supérieur permit une transgression partielle, caractérisée par une sédimentation calme parfois dans un milieu réducteur, sapropélique (argilites et siltstones plus ou moins bitumineuses)

Cette *série paléozoïque*, marine jusqu'au Carbonifère supérieur est généralement marquée par une tendance de régression et d'individualisation, malgré qu'ils aient été des phases (séquences) transgressives intermédiaires, relativement importantes. La série est composée des pélites cambriennes déjà citées, des grès de l'Ordovicien, d'argilites et grès du Dévonien (à *Paraspirifer cultrijugatus*) puis des roches carbonatées du Carbonifère (Dinantien). La série marine est surmontée par les grès continentaux du Westphalien, époque après laquelle le continent de l'Ouest-africain ne subit aucune transgression générale.

Au cours du Permien (230–275 M.A. — âges absolus publiés par l'auteur cité ci-dessus) les mouvements dilatatifs hercyniens: donnaient lieu à une *doléritisation importante du géosynclise*, sous forme de masses, laccolites, dykes et filons. En réalité, d'après les nouvelles recherches, ces roches mélanocrates sont très variées à produits de différenciation divers. Il est possible de mettre en cette époque *le début de la désintégration du continent Gondwana:*

Le *mésocraton*, soudé par le cortège doléritique restait en position continentale jusqu'au Crétacé supérieur, fait marqué par de dépôts continentaux détritiques (Continental intercalaire).

Les mouvements syncro-laramiens (alpins) ayant éloigné de l'un à l'autre l'Adrar des Iforas et le Bouclier Ivoir-Voltaïque (plaques cristallines), donnaient naissance aux *fossés d'effondrement étroits* mais de très grande profondeur (2.000–3.000 m.; fossé de Gao et celui de Tanezrouft) reliant la mer Sud-marocaine (Tindouf) au Golf de Guinée. Cette épisode marine localisée, relativement courte, se termine avec des sédiments régressifs à phosphate d'origine géochimique à l'Eocène moyen („Déroit Soudanais”).

A partir de cette intervalle, le géosynclise de Taoudennit reste en position continentale jusqu' à nos jours (néocraton), ce sont les différenciations isostatiques, les mouvements néo-tectoniques et le climat qui déterminent la sédimentation néogène (Continental terminal fluviatil, fluviolacustre et lacustre) puis quaternaire (dépôts indicateurs de climat: sols ferrallitiques et ferrisallitiques, bauxite, carapace ferrugineuse, alluvions, croûtes siliceuses, sables dunaires, remplissage de mares etc.).

Les idées exposées ci-dessus sont récentes, dues partiellement à nos recherches ou aux essais de synthèse souvent spéculatifs. En ce qui concerne la position structurale du

g é o s y n é c l i s e d e T a o u d e n n i t d a n s l e c a d r e d e l ' O u e s t - a f r i c a i n , l a **figure n° 7** propose une interprétation schématisée, utilisant les détermination de l'âge absolu, récentes faites en France.

Il est à noter que dans le domaine minier l'âge des massifs magmatiques et le rapport avec leur dénudation ait d'une importance primordiale.

VI. ACTIVITE DES EXPERTS HONGROIS, RESULTATS

1. Structure des recherches géologiques et hydrogéologiques au Mali (fin 1972)

N'a guère changé depuis l'époque coloniale; fait hérité dont le caractère principal est la *décentralisation*.

Néanmoins de plusieurs essais ont été fait afin de coordonner l'activité des différents services gouvernementaux, à résultats médiocres jusqu' à la fin 1972. Citons le cas des recherches hydrogéologiques: d'après nos connaissances, à l'époque, il y avait 4 services ou sociétés d'état qui menaient une activité plus ou moins forte dans ce but.

Dans le domaine géologique la situation fusse plus favorable, du fait qu'au début, c'était seul le Bureau Minier du Mali (SO.NA.R.E.M. à partir de 1964) qui s'efforçait de lancer un programme de levés géologiques et de prospection minière, avec une forte assistance technique soviétique (personnel et matériel).

Au cours des dernières années il était indispensable de créer un service autonome, capable de contrôler les travaux géologiques (concessionnaires parmi autres) :la Direction Nationale de la Géologie et des Mines. Les spécialistes y liés commençaient à faire des recherches de base vers le début de l'année 1971.

En ce qui concerne les **spécialistes hongrois**: la quasi-totalité des experts s'intégrait dans le cadre du Bureau Minier puis dans celui de la SO.NA.R.E.M., où on a créé une **Section d'Hydrogéologie**, dirigée d'abord par O. GYÖRKE (1962-64), G. LÁNG, (1964-66), puis par S. SZÜTS (1966-68).

A la Direction de l'Hydraulique et de l'Energie (bureau d'étude important surtout dans le domaine de l'hydraulique superficielle) il n'était que 2 experts internationaux (hongrois) du Programme des Nations Unies pour le Développement (Á. KOCSIS 1963-64 et G. LÁNG 1969-72) ayant collaboré avec les différents services mentionnés.

A la Direction Nationale de la Géologie et des Mines, il est à noter l'activité de MME. E. LÁNG géographe, collaboratrice externe de 1970 à 1972.

Le tableau récapitulatif présenté ci-après rassemble la *répartition des experts* de notre pays aux services différents:

Bureau Minier du Mali (SO.NA.R.E.M.)	1 ingénieur-hydraulicien
	5 géologues (hydrogéologues)
	6 techniciens-foreurs
	2 techniciens, spécialistes de pompes
Direction de l'Hydraulique et d l'Energie	2 géologues (hydrogéologues), experts internationaux
Direction Nationale de la Géologie et des Mines	1 géographe (géomorphologue).

L'envoi des spécialistes a été organisé par le Bureau Central de Géologie (K.F.H.), par les instituts donateurs (Institut Géologique de Hongrie p.e.) et par la Société TESCO (Organisation de Coopération Internationale Scientifique et Technique).

2. Moyens de mise en oeuvre

Comme il a été déjà mentionné, la majeure partie de l'activité de nos experts se déroulait en pleine campagne, donc les tâches essentielles étaient les préparatifs et la conduite des missions, puis l'interprétation des résultats (cette dernière généralement au cours des saisons de pluies).

Du fait qu'au Mali ait une étendue (Nord-Sud) très grande, à zones climatiques diverses (du Sahara au forêt tropicale), il y avait des missions de types différents. Voici quelques exemples:

A. Missions dans les zones sahariennes et sahéliennes

a) Reconnaissance géologique et hydrogéologique

- Personnel: 1 géologue (hydrogéologue), chauffeur en même temps de l'une des voitures
1 technicien-géologue malien
1 chauffeur
1 graisseur (aide-mécanicien ou mécanicien)
1 guide saharien en cas de nécessité
- Matériel: 1 véhicule tout-terrain léger (Land-Rover ou GAZ 69)
1 camion léger (de 1 à 1,5 tonne: Land-Rover „cabine avancée”, Power Wagon ou GAZ 63)
carburants, lubrifiants, pièces détachées, eau potable et vivres pour une autonomie de 2.000 km env.
émetteur-récepteur (de préférence)
matériels de prospection, de campement, pharmacie.

b) Forage (Hydrogéologique)

- Personnel: 1 ou 2 géologues (hydrogéologues) hongrois
1 ou 2 techniciens-géologues maliens
3 maîtres-sondeurs hongrois ou soviétiques
6 aide-sondeurs
6 manœuvres
6 chauffeurs
2 – 4 aide-chauffeurs
1 mécanicien
1 aide-mécanicien
2 cuisiniers
1 guide saharien, en cas de nécessité
- Matériel: 1 sondeuse montée sur camion (URB 3AM, 2AM ou Feeling 1.200)
1 ou 2 véhicules tous-terrains légers
2 camions légers
2 poids lourds (de 4 à 8 tonnes)
2 camions-citernes } tous-terrains
camions spéciaux occasionnellement, pour le transport des tubes, tiges etc.
1 compresseur
1 ou 2 groupes électrogènes
1 ou 2 pompes centrifuges

1 appareil à souder (à l'arc)
carburants, lubrifiants, pièces détachées, outils de forage et vivres pour une campagne de 6 mois env.
émetteur-récepteur (de préférence)
matériels de prospection, de campement, pharmacie.

L'eau potable a été transportée en camion-citerne du puits le plus proche, ou d'un forage d'exploitation d'eau déjà achevé.

Au cours des grandes missions de forage d'eau il était préféré d'organiser 3 postes de travail, à 6 heures chacun (de 6 heures du matin au minuit). Ainsi la réalisation d'un forage d'exploitation d'eau à 100 m. de profondeur moyenne durait 1 mois (pompage d'essai et déménagement compris). Le diamètre de la partie exploitée des forages variait de 6" à 8", celui de la partie crépinée de 4" à 5 3/4".

Quand a *l'approvisionnement en carburants*: avant l'exécution des missions sahariennes il fallait effectuer des reconnaissances préliminaires et des campagnes spéciales dans le but de trouver le meilleur trajet et d'y créer des dépôts. Malgré ces précautions sévères il arrivait des situations critiques (surtout à cause de l'état du parc automobile).

B. Plus au Sud, où il existe partout des lieux habités, le personnel et le matériel étaient réduits suivant les besoins, souvent des longues reconnaissances ont été effectuées avec une seule voiture et avec 3 personnes. En ce dernier cas, les sorties durant chacune de 2 à 4 jours ont été organisées partant d'une base de ravitaillement (installée dans une agglomération plus importante).

3. Campagnes effectuées, principaux résultats

Ce chapitre est présenté sous forme de *tableaux d'assemblage*, établis avec l'aide de MR. S. SZÜTS, collaborateur de l'Institut Géologique de Hongrie (coopérant à l'époque au Mali). Pendant les *10 ans de coopération* il y avait *22 campagnes* plus ou moins importantes, conduites par nos experts, en majorité dans la zone saharienne et sahélienne, dans un but généralement hydrogéologique (comme il a été déjà mentionné dans l'introduction).

Les difficultés (presque toujours techniques) étaient souvent énormes, faits lesquels diminuaient considérablement le rendement, mais *les contacts humains parfaits avec la contrepartie malienne* permirent de surpasser ces épisodes critiques.

Voici alors les tableaux d'assemblage cités:

Mission et cadre d'activité	Année et durée en mois	Chef(s) de mission	But de la campagne	Nombre des cadres hongrois	Nombre du personnel malien	Itinéraire (km)	Mètres Forés	Résultats
<i>Tilemsi (B.M.M.)</i>	1962/63 6	Aboulaye ag Dalla, G. LANG	Reconnaissance hydrogéologique du „Détroit Soudanais” et réalisation de 6 forages d'exploitation d'eau.	1	23	22 000	610	6 forages d'exploitation d'eau réalisés comme prévus, à résultats positifs, amélioration des méthodes de pompages d'essai, esquisse piéométrique de la zone d'étude.
<i>Ansongo (B.M.M.)</i>	1962/63 3	O. GYÖRKE	Achèvement de 2 forages d'eau dans le Bassin des Ioul-femmedènes.	1	21	9 000	260	Résultats concrets médiocres dûs aux conditions hydrogéologiques défavorables (Continental terminal à faible perméabilité).
<i>Tilemsi-Azaouad (B.M.M.)</i>	1963/64 5	G. LANG	Exécution de 6 forages d'exploitation d'eau dans l'Est-malien, dont 4 sur la piste caravanière Tombouctou-Taoudennit.	1	27	33 000	330	4 forages d'eau réalisés dont 2 à résultats positifs (exploitables). Première reconnaissance du Bassin de Taoudennit dans un cadre national (avec MR. M. KAYENTAO). Etablissement des esquisses hydrogéologiques de l'Azaouad.
<i>„Pompe”/I (B.M.M.)</i>	1963/64 4	O. GYÖRKE	Installation des pompes à manège (de fabrication hongroise) sur les forages précédents.	1	19	6 000	—	Installation de 6 pompes dans la Vallée du Tilemsi et dans la zone du Lac Faoui-bine.

Mission et cadre d'activité	Année et durée en mois	Chef(s) de mission	But de la campagne	Nombre des cadres hongrois	Nombre du personnel malien	Itinéraire (km)	Mètres Forés	Résultats
<i>Taoudennit/1</i> (SO.N.A.R.E.M.)	1964/65 7	G. LÁNG S. SZÜTS	Levés géologiques du Bassin Quaternaire de Taoudennit, estimation de ressource en évaporites de la „sebkha”, prospection hydrogéologique préliminaire de la partie Nord de l'Azaouad.	3	17	15 000	150 (750)	Achèvement de la carte géologique du bassin salifère („Agort”), estimation de ressources en sel-gemme et en gypse (levés classiques et 60 sondages à petite profondeur). Réalisation de 3 forages d'essai hydrogéologique dans l'Azaouad du Nord à résultats positifs.
<i>Avant-projet du P.N.U.D.</i>	1963/64 3	A. KOCSIS	Reconnaissance hydrogéologique générale du pays afin de choisir les terrains d'étude pour les missions opérationnelles du P.N.U.D.	1	2	10 000	-	Avant-projet présenté au Bureau de l'O.N.U. (Division de Transport et des Ressources Naturelles, New York)
<i>Lac Fagubine</i> (SO.N.A.R.E.M.)	1965 2	G. BOSKOVITS	Exécution d'un forage d'exploitation d'eau dans un centre d'élevage important (zone présaharienne).	1	11	5 000	80	Travaux terminés à résultat positif.
<i>Koutiala</i> (SO.N.A.R.E.M.)	1965 3	G. BOSKOVITS	Alimentation en eau de la ville de Koutiala (chef-lieu du cercle).	3	12	1 000	120	Travaux à résultats positifs (eau artésienne), le forage débitant 20 m ³ /h. Nouvelles idées concernant les aquifères des „grès horizontaux”.

<i>Mission Géotechnique de Bamako</i> (SO,NA,R,E,M.)	1965 1	S. SZÜTS	Problèmes de fondation des l'usine céramique de Bamako.	2	4	—	45	Achèvement de 3 sondages géotechniques, résolution des problèmes mentionnés.
<i>Azaouad du Nord</i> (SO,NA,R,E,M.)	1965/66 6	G. LÁNG S. SZÜTS	Réalisation de 3 forages d'exploitation d'eau sur la piste caravanière Tombouctou-Taoudennit. Essai de transport du sel-gemme.	3	40	25 000	210	2 forages d'exploitation d'eau terminés en zone saharienne, reconnaissance de la partie malienne du <i>M r e y e</i> , essai non-rentable du transport des évaporites à <i>T o m b o u c t o u</i> (mauvaises conditions routières).
<i>„Pompe”/2</i> (SO,NA,R,E,M.)	1965/66 5	A. BOTH K. HERNÁD	Installation des nouvelles pompes à manège sur les forages situés dans la zone pré-saharienne.	2	15	—	—	3 forages d'exploitation d'eau ont été équipés de pompes parmi des conditions très difficiles.
<i>Bandiagara</i> (SO,NA,R,E,M.)	1966 4	G. BOSKOVITS	Alimentation en eau de la ville de <i>B a n d i a g a r a</i> (chef-lieu du district, centre touristique important).	3	10	—	130	Travaux à résultat positif: eau artésienne, le débit étant 40 m ³ /h à 25 m. de rabattement (malgré le relief élevé: nappe suspendue dans les grès de <i>B a n d i a g a r a</i> , découverte par cette mission)
<i>Azaouad du Nord</i> (SO,NA,R,E,M.)	1966/67 4	S. SZÜTS	Reconnaissance hydrogéologique de la partie nord de l' <i>A z a o u a d</i> .	3	15	10 000	70	Découverte de la partie extrême-septentrionale de la Nappe de l' <i>A z a o u a d</i> (500 km au Nord de <i>T o m b o u c t o u</i>). Achèvement d'un forage d'exploitation d'eau. Nouvel essai de transport du sel-gemme.
<i>Bougouni</i> (SO,NA,R,E,M.)	1967 2	S. SZÜTS	Alimentation en eau d'une partie de la ville.	3	10	3 000	20	Achèvement d'un forage d'exploitation d'eau à résultat positif. Reconnaissance préliminaire des pegmatites de <i>B o u g o u n i</i> .

Mission et cadre d'activité	Année et durée en mois	Chef(s) de mission	But de la campagne	Nombre des cadres hongrois	Nombre du personnel malien	Itinéraire (km)	Mètres forés	Résultats
<i>Nara</i> (SO.NA.R.E.M.)	1967 2	S. SZÜTS	Essai de l'alimentation en eau de la ville (centre de transhumance important)	3	17	8 000	60	Le forage d'essai ayant traversé une zone diaclésée, exploitait des eaux saumâtres. Reconnaissance dans la Vallée du Serpent (placers de monazite).
<i>Bougouni</i> 2 (SO.NA.R.E.M.)	1968/69 5	S. SZÜTS J. PALMAI	Levés géologiques des pegmatites lithifères de Bougouni. Essai d'application de la méthode géobotanique.	4	18	15 000	320	Carte géochimique présentée de la zone lithifère, découverte des nouveaux gisements rentables.
<i>Mission géotechnique</i> <i>Bougouni-Sikasso</i> (SO.NA.R.E.M.)	1968 2	S. SZÜTS	Problèmes de reconstruction des ponts de la route principale Mali-Côte d'Ivoire.	3	8	-	120	Réalisation de 7 sondages géotechniques aux bords des fleuves Bagoé et Banifing.
<i>Taoudennit</i> 2 (SO.NA.R.E.M.)	1968 3	G. BOSKOVITS	Réalisation d'une forage de reconnaissance à profondeur moyenne au centre du Bassin.	3	18	-	120	Travaux interrompus à cause des difficultés techniques (voir suite en 1969).
<i>Taoudennit</i> 3 (P.N.U.D.- SO.NA.R.E.M.)	1969 2	G. LANG	Continuation du forage de reconnaissance interrompu en 1968.	3	25	5 000	130	Fin du forage de reconnaissance au centre du Bassin: découverte d'une nappe d'eau ultra-saumâtre à gaz carbonique. Etude des gites métallifères liés aux dolérites. Nouvelle interprétation de genèse de la „sebkha”.

Cartes géologiques et hydrogéologiques présentées en échelles différentes. Nouvelle esquisse stratigraphique et tectonique de la zone. Appréciations concernant les gîtes métallifères. Implantation de 22 forages d'eau avec l'équipe géophysique de l'O.N.U. (13 à résultats positifs, dont 7 sont exploitables).

Levés hydrogéologiques systématiques du Sahel afin de découvrir et de mettre en valeur les eaux souterraines.

1969/70 G. LANG

Etude géologique et hydrogéologique du Sahel (P.N.U.D.-D.H.E.)

1330*
(250)

3 22 000

1

Inventaire complète des points d'eau, essai d'établissement d'un bilan, estimation de ressources en eaux souterraines de la Plaine. Cartes hydrogéologiques présentées de l'aquifère. Réalisation de 2 forages d'exploitation d'eau implantés par la géophysique.

Levés hydrogéologiques détaillés de la Plaine, implantation de nouveaux ouvrages d'exploitation d'eau.

1971/72 G. LANG

Gondo (P.N.U.D.-S.O.N.A.R.E.M.)

260*

2 18 000

1

Etude géomorphologique de la zone saharienne et sahéloenne (D.N.G.M.) avec les missions P.N.U.D., D.H.E. et S.O.N.A.R.E.M.

Levés géomorphologiques du Bassin Quaternaire de Taoudennit et du Sahel s.str., essais d'application.

1969/71 MME E. LANG

Cartes géomorphologiques et études présentées des zones citées, synthèse du développement des cours d'eau fossils sahéloens, étude de leur mise en valeur. Photogéomorphologie dans le domaine minier.

item, voir missions Sahel, Taoudennit/3 et Gondo.

Abréviations:

B.M.M. - Bureau Minier du Mali

D.H.E.

- Direction de l'Hydraulique et de l'Energie

D.N.G.M.

- Direction Nationale de la Géologie et des Mines

O.N.U.

- Organisation des Nations Unies

P.N.U.D.

- Programme des Nations Unies pour le Développement

S.O.N.A.R.E.M.

- Société Nationale de Recherches et d'Exploitations Minières

(250)

- mètres forés, réalisés à la tarière à main

260*

- mètres forés, réalisés par l'équipe de sondage des Nations Unies, dans le cadre du même projet.

VII. RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES RECONNUES

1. Systèmes aquifères proprement dits

a) *Nappes en correspondance avec le Delta Intérieur du Niger*

Divisés par une dorsale imperméable du substratum précambrien sédimentaire, de nos connaissances il existe deux systèmes aquifères à nappes d'eau libres dans les dépôts fluvio-deltaïques du Continental terminal: celui de l'Azaouad du Sud et du Nord.

L'infiltration (indirecte) à travers des alluvions quaternaires du Niger et du Lac Faguibine est de l'ordre de $10^6 - 10^7$ m³/an (estimation préliminaire), l'étendue des deux nappes est 100'000 km² env. Le coefficient de perméabilité des dépôts sablonneux ou gravillonneux est généralement $10^{-3} - 10^{-4}$ cm/sec., la ressource statique étant 4. 10¹⁰ m³ env. au Sud et 10¹¹ m³ env. au Nord.

L'Azaouad était la zone d'activité la plus importante de nos spécialistes. La découverte de la limite septentrionale encore exploitable de la nappe de l'Azaouad du Nord est un résultat impressionnant (forage de Foumel Alba, réalisé par S. SZÜTS en 1967, 500 km au Nord du fleuve Niger).

b) *Fossé d'effondrement de Nara-Lac Faguibine*

Ce graben tectonique orienté dans la direction ENE-WSW, à 27.000 km² de l'étendue env. est rempli de sédiments continentaux du Mésozoïque (Continental intercalaire fluvio-lacustre), dont l'épaisseur moyenne est 300 m. env. La nappe y renfermée, captive dans un certain sens, peut être alimentée aux bords faillés du fossé et le long du Lac Faguibine (donc elle serait en contact hydraulique avec la nappe de l'Azaouad du Nord). La perméabilité des sables et des grès fins est moins bonne comme dans le cas précédent, mais due à la grande épaisseur du remplissage, la ressource statique est considérable (10¹¹ m³ env.). L'étude de la partie occidentale (P.N.U.D.) et orientale (S.O.N.A.R.E.M.) de cette nappe était une activité importante des experts de notre pays.

c) *La nappe du seuil de l'Adrar des Iforas (Détrioit Soudanais)*

Alimentés par les ruissellements temporaires de l'Adrar des Iforas, les couches gravillonneuses du Sénonien continental renferment une nappe captive, laquelle contourne les périmètres méridionaux du massif cristalin. Ayant une très bonne perméabilité, son alimentation étant assurée, située dans la zone d'élevage

principale, la mise en valeur de cette nappe de 20.000 à 25.000 km² de l'étendue est très importante. (*La coopération hongroise au Mali commençait en 1962 dans cette région: achèvement de 6 forages d'exploitation d'eau.*)

d) *Nappe artésienne du Bassin des Ioullemmèdenes*

Sa majeure partie étant en la République du Niger, la découverte et la mise en valeur de cette nappe date de 1964, grosso-modo en même temps aux deux pays (au Mali par les spécialistes soviétiques, dans la Vallée de l'Azaouak). Cet énorme bassin sédimentaire renferme les dépôts du Continental terminal à peine aquifères (voir Mission Ansongo), la série marine du Crétacé-Eocène et le Continental intercalcaire aquifère, très épais, dans une profondeur relativement grande (500–600 m). Les caractéristiques hydrauliques n'y sont pas connus par manque d'ouvrages suffisants, il est sûr, qu'elle est artésienne dans les dépressions et le long des grands oueds. L'alimentation peut être liée à la nappe du seuil de l'Adrar des Iforas (décrite ci-dessus).

e) *Nappe du Gondo*

Etudiée en détail en 1971/72 par l'équipe des Nations Unies (M. BRO, G. LÁNG et P. MALJEAN) *c'est une des nappes (libres) la plus célèbre de l'Afrique Occidentale*. Située partiellement en Haute-Volta, son étendue étant 32.000 km², la ressource statique retenue dans les dépôts fluvio-lacustres du Continental terminal est de l'ordre de 2. 10¹⁰ m³, la ressource dynamique 3 – 4. 10⁷ m³/an. Une grande partie du substratum (du Précambrien supérieur) est karstifiée (calcaires dolomitiques d'„Irma”) ou silicifiée (processus géochimique étudié dernièrement par les doyens R. DARS, et G. MILLOT, par Mlle H. PAQUET et par moi-même).

Le bilan étant fortement positif, la nappe est en cours de remplissage (20 – 30 mm d'augmentation de niveau d'eau par an).

f) *Nappe de la Boucle du Niger (Gourma)*

Découverte de R. REICHEL (1958/61, géologue du B.R.G.M.). Dans la zone septentrionale du Gourma, aux flancs des synclinaux constitués des roches carbonatées et des „grès poudreux poreux”, il existe des possibilités d'infiltration des eaux alluvionnaires du Niger, dans la direction SSE. Un certain nombre de forages d'exploitation d'eau à bons résultats justifiait les thèses de l'auteur cité, dans cette zone considérée précédemment stérile.

g) *Nappe artésienne salée du Bassin de Taoudennit*

Le bassin sédimentaire de Taoudennit, individualisé au cours du Dévonien, peut renfermer d'énormes réserves d'eau salée (probablement à hydrocarbures). La nappe a été mise en pression en plusieurs phases pendant les pluvieuses du Quaternaire, par l'intermédiaire de la nappe de l'Azaouad du Nord ou la falaise tectonique du Hank.

En 1964/65, 1968 et en 1969 l'étude de ce problème et celle des évaporites liées faisait l'objet de recherche de nos spécialistes. Le seul forage structural exécuté est celui de „T.1.”, déjà cité, au centre du bassin, ayant atteint 330 m. de profondeur. *Il capte des eaux ultra-saumâtres et du gaz carbonique.*

2. Accumulations d'eau locales

Sur les 60 % du territoire malien, d'après nos connaissances, il n'existe que des accumulations d'eau locales dans les zones fissurées ou altérées, mais dans certaines régions ces cas sont rares ou néants.

Il est à noter d'une part la découverte des nappes s.l. (suspendues, perchées) dans les grès horizontaux (forages de Koutiala et de Bandiagara: succès de nos équipes), d'autre part les grands efforts de l'équipe des Nations Unies (cadre dans lequel je travaillais) faits dans le sens d'améliorer la situation d'eau critique du Sahel s.str. *Malheureusement à l'exception de la mise en valeur de certaines nappes alluvionnaires ou dunaires, les problèmes fondamentaux n'ont pas été résolus.*

3. Problèmes d'exploitation des nappes

Au Mali, comme dans les pays voisins, il faut compter avec deux facteurs lesquels rendent difficile l'exploitation des eaux souterraines retrouvées ou même captées:

- *le niveau statique des nappes* (soient libres ou captives) *se situe généralement très bas* (de 30 à 80 mètres au dessous de niveau du sol dans les forages déjà existants),
- dans les zones d'élevage principales *les centres administratifs sont très éloignés*, ainsi, l'entretien des pompes pose d'énormes problèmes.

Il faut remarquer, que jusqu'ici il n'existe aucun système de pompe lequel est capable de résister pendant longtemps aux conditions climatiques, sans entretien régulier. Ainsi, malgré qu'il y ait une centaine de forage d'exploitation d'eau achevés à résultats satisfaisants, ils sont généralement fermés, ou la pompe y montée est en panne.

De notre avis, dans l'avenir, rejetant la méthode conventionnelle de forages d'eau, *il faudrait améliorer la technique de creusement des puits à grand diamètre*, ou jumeller les forages d'exploitation d'eau à „puits-citernes”, si la pression de la nappe permet cette dernière opération.

Dans tous les cas, naturellement, il faut respecter la succession obligatoire des phases de prospection (reconnaissance – levés géologiques complémentaires – photo-géologie – géomorphologie – géophysique – forages et pompages d'essai – exécution de l'ouvrage définitif).

BIBLIOGRAPHIE FONDAMENTALE

- Carte géologique de l'Afrique (1966–1969), avec notices explicatives. 6 feuilles. Moscou.
- BENSE C. (1964): Les formations sédimentaires de la Mauritanie méridionale et du Mali occidental. (Afrique de l'Ouest.) *Mém. B.R.G.M.*, n° 26.
- CASTANY G. (1963): Traité pratique des eaux souterraines. *Dunod*, Paris.
- DARS R. (1961): Les formations sédimentaires et les dolérites du Soudan occidental (Afrique de l'Ouest). *Mém. B.R.G.M.*, n° 12.
- DEFOSSEZ M. (1958): Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la Boucle du Niger. *Mém. B.R.G.M.*, n° 13.
- FURON R. (1950): Géologie de l'Afrique. *Payot*, Paris.
- KARPOFF R. (1958): La géologie de l'Adrar des Iforas. *Bull. Serv. Mines* n° 30, Dakar.
- PALOUSI G. (1959): Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des formations primaires au Soudan méridional et en Haute-Volta. *Bull. Serv. Géol. Prosp. Min.*, n° 33, Dakar.
- P.N.U.D. (*Programme des Nations Unies pour le Développement.*) Rapports inédits de l'activité des experts du Projet pour la Recherche des Eaux Souterraines (géologie, hydrogéologie, géophysique et forages, 1969–1972), Bamako, Mali.
- RADIER H. (1959): Contribution à l'étude géologique du Soudan oriental. *Bull. Serv. Prosp. Mines*, t. I–II, n° 26, Dakar.
- REICHEL T. (1972): Géologie du Gourma. *Mém. B.R.G.M.*, n° 53.
- SO.NA.R.E.M. (*Société Nationale de Recherches et d'Exploitations Minières*): rapports inédits des spécialistes hongrois et soviétiques dans le domaine hydrogéologique (1962–1968), Bamako, Mali.
- VILLEMUR J. R. (1967): Reconnaissance géologique et structurale du Nord du Bassin de Taoudennit. *Mém. B.R.G.M.*, n° 1.
- VINOGRADOV A. P. (1970): Nouvelles déterminations de l'âge absolu des glauconites de l'Afrique Occidentale. *C. R. Ac. Sc. U.R.S.S.*, t. 198, n° 6.

**Underground Water Research Done
by Hungarian Experts in a Semi-arid Tropical Country
(Republic of Mali, West Africa, 1962–1972)**

by
G. LÁNG

Abstract

The Republic of Mali (the ex-French Sudan) is a typically continental West African country, poor in mineral resources. National income sources are: agriculture (ethnic groups settled down) and live-stock raising (nomadic arabo-berber tribes). The climate is hot and dry over most part of the year. The northern one-third of the country is of desert character (SW Sahara). Accordingly, ground water exploration is of paramount importance. *The catastrophic precipitation deficiency of the past years also contributed to the rising demand for hydrogeological activities aiming at additional water supply sites, for settlements, live stock raising zones, caravan routes and also for regions with mineral resources of economic importance.*

The Hungaro–Malian cooperation, launched by an intergovernmental agreement, lasted 11 years. *Between July 1962 and December 1972, 16 Hungarian experts worked in the country* (geologists, drilling specialists etc.), primarily on the basis of a bilateral state agreement, and in a subordinate measure, under the auspices of UNO (UNDP). The total duration of field work amounted to 97 geologist-months and 104 technician-months; itineraries – about 200 000 kilometres, and the area covered by mapping (on different scales) 140 000 square kilometres.

The activity of Hungarian experts has not been restricted to hydrogeology only, as shown in the following.

1. *Hydrogeology*
 - general hydrogeological reconnaissance (traditional methods of exploration)
 - hydrogeology upon quantification (estimation of water resources)
 - applied hydrogeology (determination of water demand, siting and completion of wells, hydrogeological tests)
 - hydrogeological synthesis
2. *Geology*
 - geological mapping/scale 1/10 000–1/500 000
 - geological mapping (scale 1/10 000–1/500 000), according to international standards
 - mineral prospecting for
 - evaporites in the Sahara
 - lithium–berillium pegmatites
 - mineralisation bound to dolerites
 - stratiform enrichments in sapropelic sediments
 - occasional engineering-geological studies
3. *General and applied geomorphological mapping*
4. *Technical assistance*
 - drilling for water

- expedition management
- mounting of Hungarian-made pumps.

During these 10 years, altogether 176 boreholes were drilled (totalling 5 445 ms). Of these, 24 have been transformed into wells.

The expeditions directed by Hungarian geologists were at work mainly in the marginal areas of the Sahara and in the desert itself, at distances of about 2 000 kilometres from Bamako, the capital (see Fig. 1). **Figures 2–6 demonstrate the methods of mapping and map plotting techniques used in the areas in question.**

Geological and hydrogeological research is rather decentralised in Mali. However, most of the Hungarian experts were working with SONAREM, creating an inside Department of Hydrogeology.

The bulk of the activities having consisted of field work, a very important task was to prepare and organize the expeditions with particular care. Problems were of course widely different for the northern (desertic, uninhabited) regions and for the southern (densely inhabited) ones, respectively. *Hungarian experts have organized and directed altogether 21 expeditions.* The relevant data and principal results are given in form of a table in the French text.

The physical geography of Mali is controlled by its geological setting and climate, both Quaternary and actual.

1. *Hydrography*: 4 continent-scale catchment areas, i.e. those of
 - the Niger (30 per cent of the country's surface),
 - the Senegal (about 15 per cent),
 - the Volta (about 2 per cent),
 - the closed, undrained depressions of the Southern Sahara (about 53 per cent).

The Niger, Africa's third-biggest river, plays a decisive role in the country's life (navigation, fishery, recharge of underground aquifers). Its hydrographic parameters are sufficiently known, while the water circulation in the Saharian depressions which constitute more than half of the country, is rather poorly known.

2. The country can be subdivided into 10 *physiographic regions* according to geological, orographic, hydrographic and climatic criteria. One of them is ranged to the hyperarid Saharian zone, two belong to the marginal zone of the Sahara, four to the transitory Sahelian zone; the climate of the southern regions is almost humid-tropical.

3. *Geomorphological investigations* were made in the Saharian zone and in the marginal zone of the desert. The following relief form groups have been distinguished and mapped.

- a) Saharian Zone:
 - denudation and pedimentation macroforms
 - structural forms
 - accumulation forms (basins and aeolic ones)
 - hydro-aeolic forms

- b) Marginal and Sahelian Zones: in consequence of the rhythmical alternation of longer dry and shorter wet seasons, these zones are characterized by form groups of complex genesis, with several types of Quaternary or older relict surfaces.

As for the geological setting, the most part of Mali belongs to the Taoudennit sedimentary basin, which is one of the biggest in the world. The evolution of this geosyncline is connected with the *formation and periodical, step-by-step consolidation of the West African craton*. This process had started 1800–2000 m.y. ago with the so-called Eburnian orogeny (Middle Precambrian; the latest classical orogenic cycle in this area) and ulterior transgressions found a gradually more and more rigid substratum. (*Intra-cratonic sedimentary basin character*.) The main formations established (most of them representing incomplete sedimentary cycles) are:

1. Basement Complex (Middle Precambrian or even more ancient crystalline rocks)
2. Late Precambrian marine (littoral and basin) sedimentary rocks
3. Cambrian-Late Carboniferous marine sedimentary series
4. „Continental intercalaire”, a term comprising all terrigenous sediments of the Mesozoic era;
5. Late Cretaceous – Middle Eocene marine sequence;
6. Neogene „Continental terminal”;
7. Quaternary, climate-marker sediments.

The craton was affected by basic (doleritic) magmatism during the Late Carboniferous–Permian.

The ideas concerning the structural pattern of Central West Africa are visualized in Fig. 7.

Principal ground water resource systems established

1. Regional aquifers

a) In the Neogene fluvial formations of the „Continental terminal” connected with the present-time inner delta of the Niger, enormous dynamic water reserves are known over an area of about 100 000 square kilometres (North and South Azaouad). The reservoirs are recharged by the river and the lakes of the inner delta region.

North Azaouad was one of the main areas studied by Hungarian experts (in view of water supply alongside the caravan route).

b) The tectonic graben located between Nara and Lake Faguibine, filled up by terrigenous sediments of the Mesozoic („Continental intercalaire”), over an area of about 27 000 square kilometres stocks static water reserves up to 10^{11} cubic metres. However, its water balance is poorly known, because recharge conditions could not be cleared so far. (In 1969/70, this was one of the areas of research financed by UNDP).

c) The permeable basis of the Cretaceous–Eocene sequence encircling the crystalline mass of the Adrar des Iforas Mountain is the main aquifer of the area (20–25 000 square kilometres). In 1962/63, it was investigated under the direction of Hungarian experts.

d) Practically the single area in Mali, hopeful for artesian water, is the Ioullemmeden Basin. Costs are, however, liable to be very high because of the great depth („Continental intercalaire”).

e) The extensive but delimited free-level groundwater reservoir system of Gondo Plain has been studied by a UNDP water prospecting team, with the participation of a Hungarian expert. This is an area of 32 000 square kilometres, with probable static reserves of $2 \cdot 10^{10}$ cubic metres and dynamic resources of $3\text{--}4 \cdot 10^7$ cm/year.

f) In Late Precambrian limestones and porous sandstones of the Niger bend R. REICHEL (BRGM, France) discovered accumulations of underground water, being recharged from the Niger.

g) The closed, saline artesian water system of Taoudennit basin was discovered by Hungarian experts in 1968/69.

2. Local accumulations of subsurface and ground water

About 60 per cent of Mali's territory is barren, respectively only local water accumulations are known to occur in the zone of rock alteration, in detrital slopes, in alluvia, or in the diachases of some sandstones and quartzites. These are directly depending on the quantity and distribution of the annual precipitation.

* * *

The crucial problem for Mali's water supply enfocusses in having difficultuies about the safe yield of subsurface water found and cased in boreholes, for their hydrostatic level is situated too deep beneath surface. Pumping equipments hitherto applied are apparently inefficient when used in regions distant from administrative centres. It is not very probable that better ones could be constructed in the future. Accordingly, well drilling technology should be modified (switching over to bigger hole diameter).

There are still many uncleared problems in the hydrogeology of Mali. However, it is probable that no new aquifers could be discovered in the future. The first, let us say qualitative stage of water exploration already is finished there – due, among others, to substantial contributions by Hungarian experts.

Fig. 1. Research areas in Mali studied by Hungarian experts (1962–72). – Main works completed.

1, main itineraries; 2, area covered by mapping; 3, area of reconnaissance; 4, water prospecting borehole drilled under the direction of Hungarian experts; 5, structural borehole completed; 6, area of pump mounting; 7, engineering geological work.

Fig. 2. Example of a large-scale geological map (Taoudennit Quaternary Basin, by G. LÁNG and S. SZÜTS 1965)

Holocene, late and early: 1, saline clay; 2, gypsiferous series, **Holocene, early:** 3, rock salt and glauberite bearing series; 4, rock salt, glauberite and mirabilite bearing series. **Holocene, undifferentiated:** 5, sand dunes. **Late Carboniferous: Westphalian:** 6, continental sandstone; 7, saline and gypsiferous clay; 8, limestone and dolomite (Viséian); **Permian:** 9, dolerite dyke; 10, quartz porphyry; 11, fault 12, exploitation pit (rock salt); 13, cote; 14, line of section explored by drilling; 15, structure-exploratory borehole, drilled in 1969.

Fig. 3. Example of a small-scale geological map (S a h e l, by G. LÁNG 1971)

Quaternary: 1, thick alluvium, clay and sand; 2, dune sand, fixed. **Permian:** 3, dolerites of different generations and their differentiation products; 4, metasomatic magnetite at the dolerite contact. **Cambrian:** 5, recifal, dolomitic limestone with stromatoliths; 6, siliceous „Siracoro” sandstone; 7, dark, bituminous, sapropelic claystone; 8, undifferentiated Cambrian: different claystones and siltstones; 9, fault; 10, contours of the Cambrian intracratonic basin; 11, water prospecting borehole; 12, local administrative centre; 13, main road (of temporary access); 14, state frontier.

Fig. 4. Example of a large-scale geomorphological map. Detail of the Taoudennit Quaternary Basin, Saharian Zone. Mapped by MRS. E. LÁNG, 1969

Denudation and pedimentation forms, modified by deflation: 1, residue of a high sandstone mesa („garat”); 2, residue of a sandstone mesa protected by doleritic dykes („gleib”); 3, residual mesa in intermediary position, constituted by carbonate rocks. Inherited surface; 4, piedmont; 5, escarpment on the piedmont, in general; 6, escarpment produced by deflation; 7, accumulation zone of the piedmonts („playa”); 8, direction of transport on the piedmont; 9, piedmont-playa boundar. **Aeolian forms:** 10, sand dune shadowed by obstacles; 11, 12, irregular sand cover of varying thickness. **Hydro-aeolian forms:** 13, flow and fan of detritus; 14, wadi (oued). **Lacustrine forms:** 15, neotectonic boundary of the „sebkha”; 16, depression contours in the sebkha; 17, desiccation aureole (lacustrine terrace); 18, 19, polygonal surface of the saliferous and gypsiferous sebkha. **Deposits:** 20, coarse eluvium of the mesas (hammada-type deposits); 21, eluvium of the doleritic dykes; 22, blocks (coarse deluvium); 23, slope detritus; 24, slope detritus with wind-blown sand; 25, sandy deposits in the wadis; 26, lacustrine mud with evaporites.

References: the geological surveying and reserve estimation of the evaporites in the Agorgot Basin (SO.NA.R.E.M. by G. LÁNG and S. SZÜTS, 1965).

Fig. 5. Example of a small-scale geomorphological map (Detail of the general geomorphological map of the Sahel region, by MRS. E. LÁNG 1970)

Denudation forms: 1, residual, silicified mesa in intermediary position; 2, residual mesa in eroded position; 3, piedmont; 4, denudation escarpment; 5, contours of the sandstone mesa (high pediment of Mandigue Plateau) with crust („cuirasse”) and fossil ferralitic soils; 6, dolerite butte (selective denudation). **Accumulation forms:** 7, boundary of the accumulation zone of neotectonic origin („playa”); 8, terrain of longitudinal, fixed dunes; 9, denuded terrain of unoriented dunes; 10, recent marginal dunes; 11, aeolian sandy cover, of varying thickness, without visible structure. **Hydro-aeolian forms:** 12, temporary water courses; 13, crest line; 14, river terrace (Early Holocene). **Lithology:** 15, eluvial cover (fragments of sandstones, claystones, dolerites etc.); 16, deluvial cover (on the piedmont); 17, alluvium. **Other signs:** 18, cote; 19, lateritic or sandy track (unaccessible in August); 20, state frontier.

Fig. 6. Hydrogeological map. Details of the work at Niore (Sahel) (by M. BRO and G. LÁNG, UN Project)

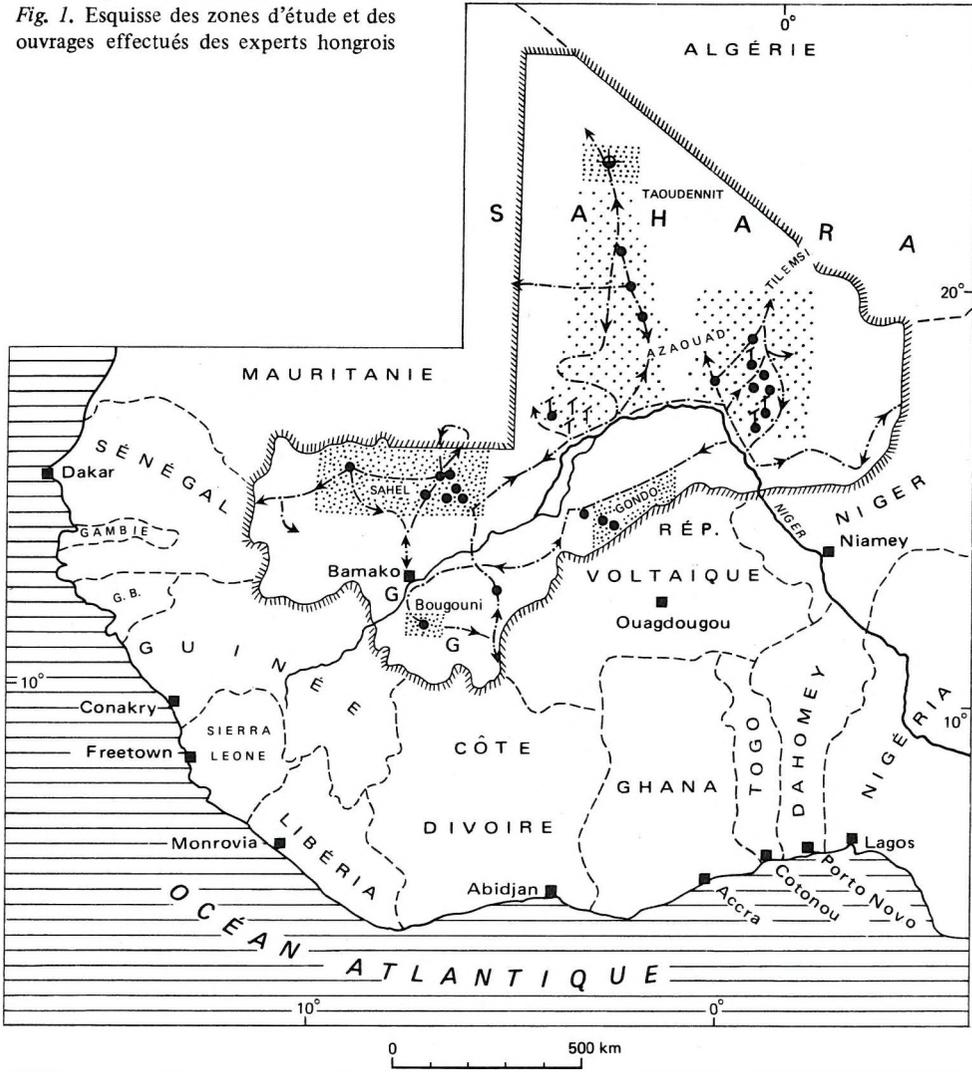
6/a, Location map. Works accomplished (1st phase); 6/b, Basement surface map; 6/c, Thickness of the Quaternary sediments; 6/d, Isopiesometric map; 6/e, Water resistivity map; 6/f, Hydrogeological sketch. Proposed exploitation establishments.

1) **Aquifers:** 1, barren zone; *contiguous and permanent aquifer, fossil fan:* 2, < 5 m thick aquifer; 3, 5–10 m thick aquifer; 4, > 10 m thick aquifer. 2) **Dry residue of the water:** 5, very pure freshwater (< 240 mg/l); 6, freshwater (240–420 mg/l); 7, slightly saline water (420–850 mg/l); 8, grackish water (850–1900 mg/l). 3) **Infiltration, alimentation:** 9, lateral, during the rainy season; 10, drainage direction during the dry season. 4) **Recommendations:** 11, water exploitation borehole; 12, piosometer; 13, pumping station, biological cleaning station; 14, boundary of the exploitation zone; 15, proposed water conduit.

Fig. 7. Structural sketch of Central West Africa

I. **Intra(1) and peri(2) cratonic sedimentary series of Paleozoic age:** 1) *Taoudennit Geosyneclyse:* a, Carboniferous, marine–continental; *marine:* b, Devon; c, Cambro–Ordovician; d, Cambrium. 2) „Tassilian” zone: II. **Sedimentary basement of Late Precambrian age (600–1000 million years):** a) shelf facies; b, basin facies. III. **Crystalline basement:** a, „rejuvenated” series (in the main mobile zone); b, cratogenesis of about 600 m.y. (near the mobile zone); c, eburnian or anterior cratogenesis (> 2000 m.y.); d, crystalline formations covered by post-paleozoic series. IV. **Principal dolerite outcrops (of Permian age):** V. **Structure:** a, main mobile zone (boundary of the West African craton); b, secondary, pericratonian mobile zone; c, secondary, pericratonian mobile zone; d, subsidence boundary of the Late Precambrian basins; e, faulted zone (initial alpine movements); f, neotectonic depression; g, state frontier.

Fig. 1. Esquisse des zones d'étude et des ouvrages effectués des experts hongrois



itinéraires principales



zone cartographiée



zone couverte par des reconnaissances différentes

● forage d'exploitation d'eau réalisé avec la participation des experts hongrois

⊕ forage structural achevé

† zone de montage des pompes à manège

G travaux géotechniques

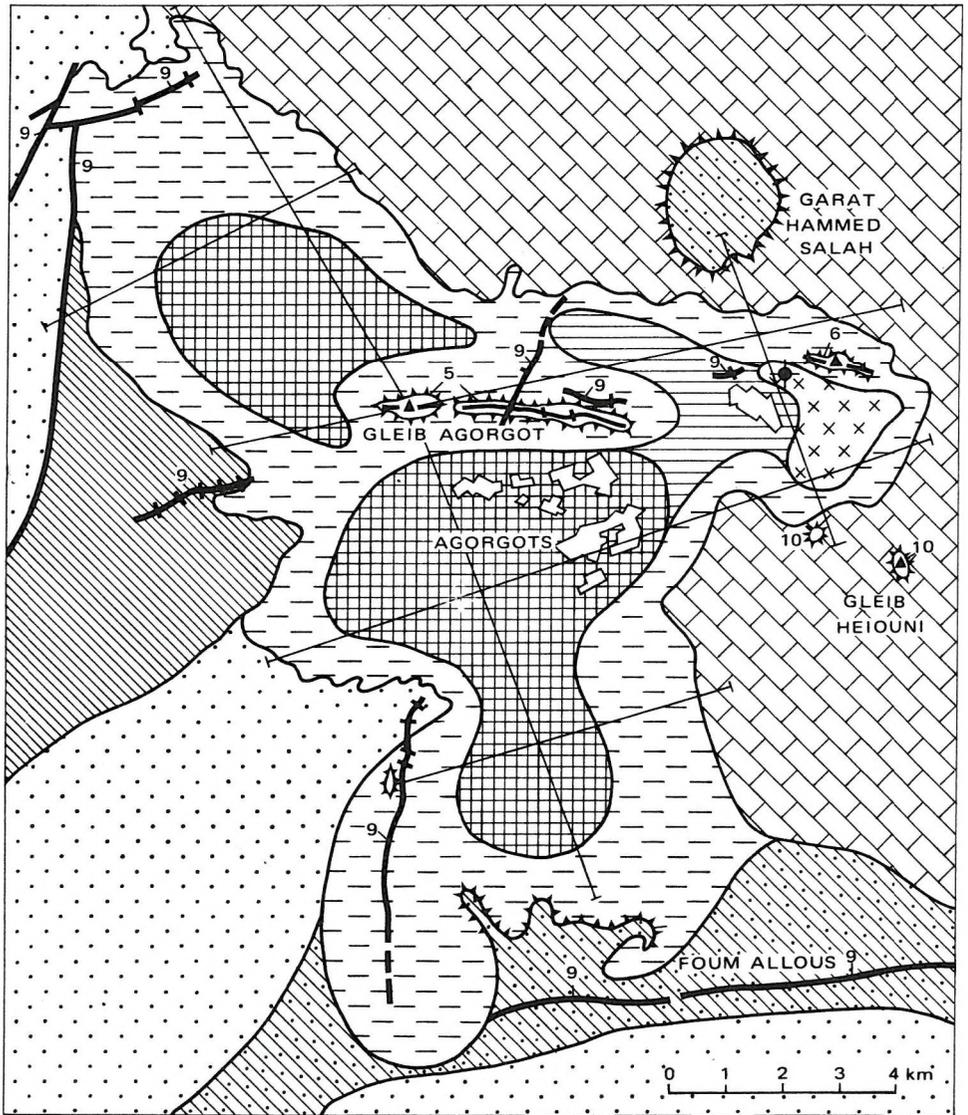
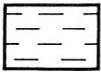


Fig. 2. Exemple d'une carte géologique (Bassin Quaternaire de Taoudennit, Sahara Ouest-méditerranéen)
G. F. LÁNG-S. SZÜTS, 1965

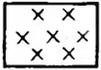
Holocène récent et ancien:



argiles salines



calcaire et dolomies (Viséen)



série de gypses



Filon de dolérite

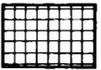
Holocène ancien:



série de sels gemmes et de glauberites



porphyre quartzifère (Permien)

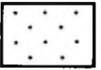


série de sels gemmes, de glauberites et de mirabilites



Fracture

Holocène en général:



sables de dunes

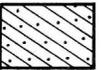


Fossé d'exploitation du sel gemme.



Point côté

Carbonifère supérieur:



grès continentaux



Ligne de profil explorée par sondages



argiles salines et gypsifères

(Westphalien)



Forage structural exécuté en 1969.

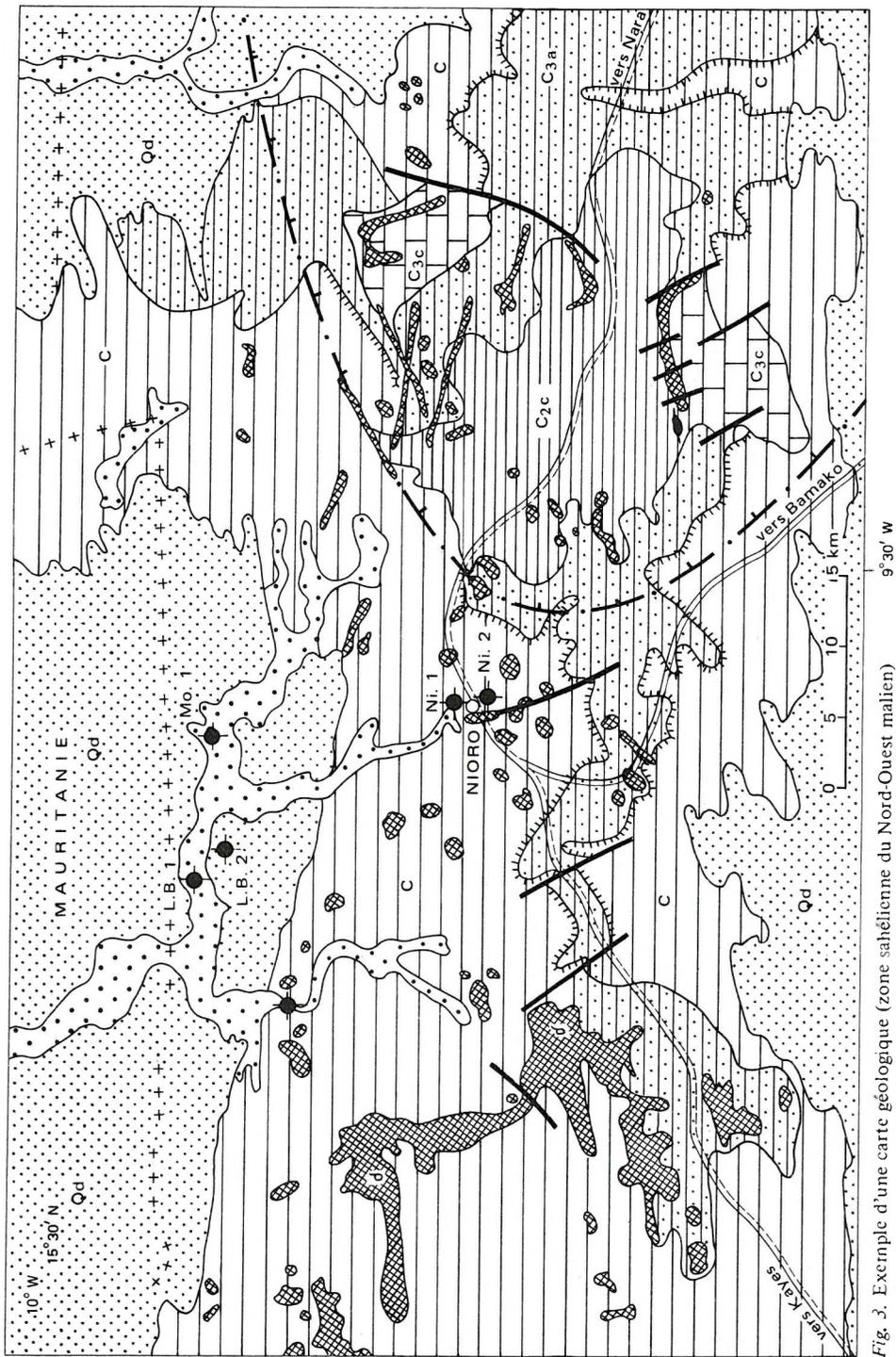
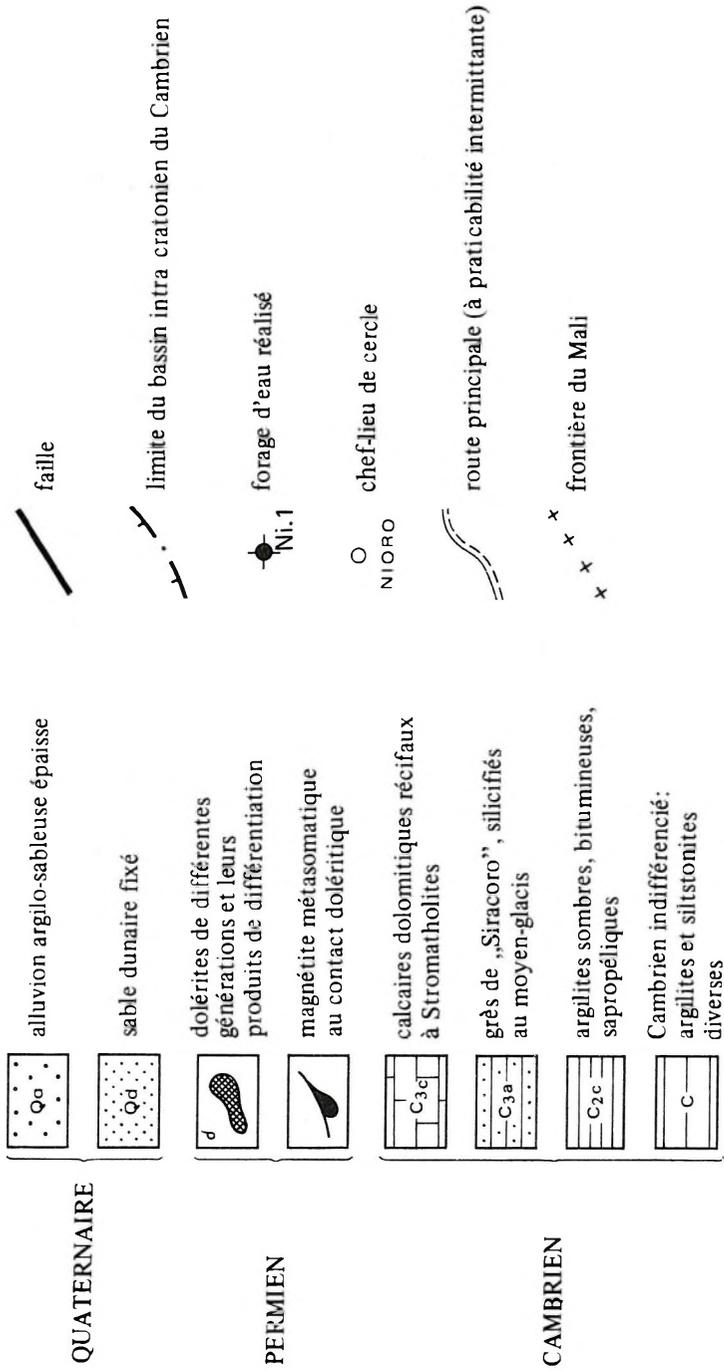


Fig. 3. Exemple d'une carte géologique (zone sahélienne du Nord-Ouest malien)
G. F. LANG, 1971



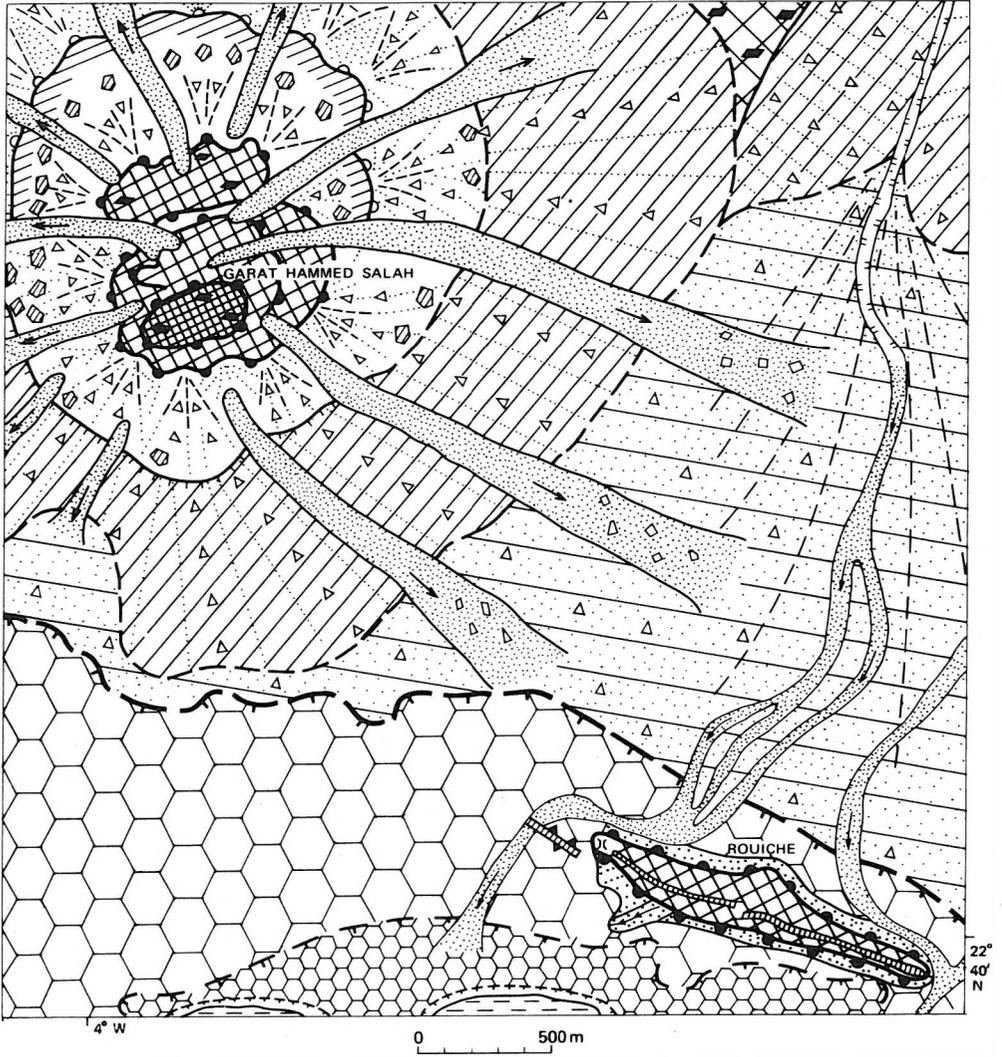


Fig. 4. Exemple d'une carte géomorphologique (Bassin Quaternaire de Taoudennit)

Travaux utilisés: levés géologiques et estimation de ressources en évaporites du Bassin d'Agorgot (SO.NA.R.E.M.)

G. F. LÁNG-S. SZÜTS, 1965

FORMES DE DENUDATION ET DE PEDIMENTATION, MODIFIEES

PAR LA DEFLATION:

-  résidu de haute plate-forme tabulaire, constituée de grès („garat”)
-  résidu de plate-forme gréseuse, protégée par de filons doléritiques („gleib”)
-  plate-forme résiduelle en position intermédiaire, constituée de roches carbonatées. Surface héritée
-  piedmont
-  escarpement sur le piedmont en gén.,
-  escarpement d'origine de déflation
-  zone d'accumulation des piedmonts („playa”)
-  sens de transport sur le piedmont
-  limite piedmont-playa

FORMES EOLIENNES:

-  dune de sable à l'abri des obstacles
-  couverture sablonneuse irrégulière, plus ou moins épaisse

FORMES HYDRO-EOLIENNES:

-  coulée et cône d'éboulis
-  oued

FORMES LACUSTRES:

-  limite (néo-tectonique) de la „sebkha”
-  limite de dépression dans la sebkha
-  auréole de dessèchement (terrasse lacustre)
-  surface polygonale de la sebkha salifère et gypsifère
- 

DEPÔTS:

-  éluvion grossière des plate-formes (dépôts hammadiens)
-  éluvion des filons doléritiques
-  blocs (déluvion grossière)
-  éboulis de pente
-  éboulis de pente à sable éolien
-  dépôts sablonneux des oueds
-  limon lacustre à évaporites

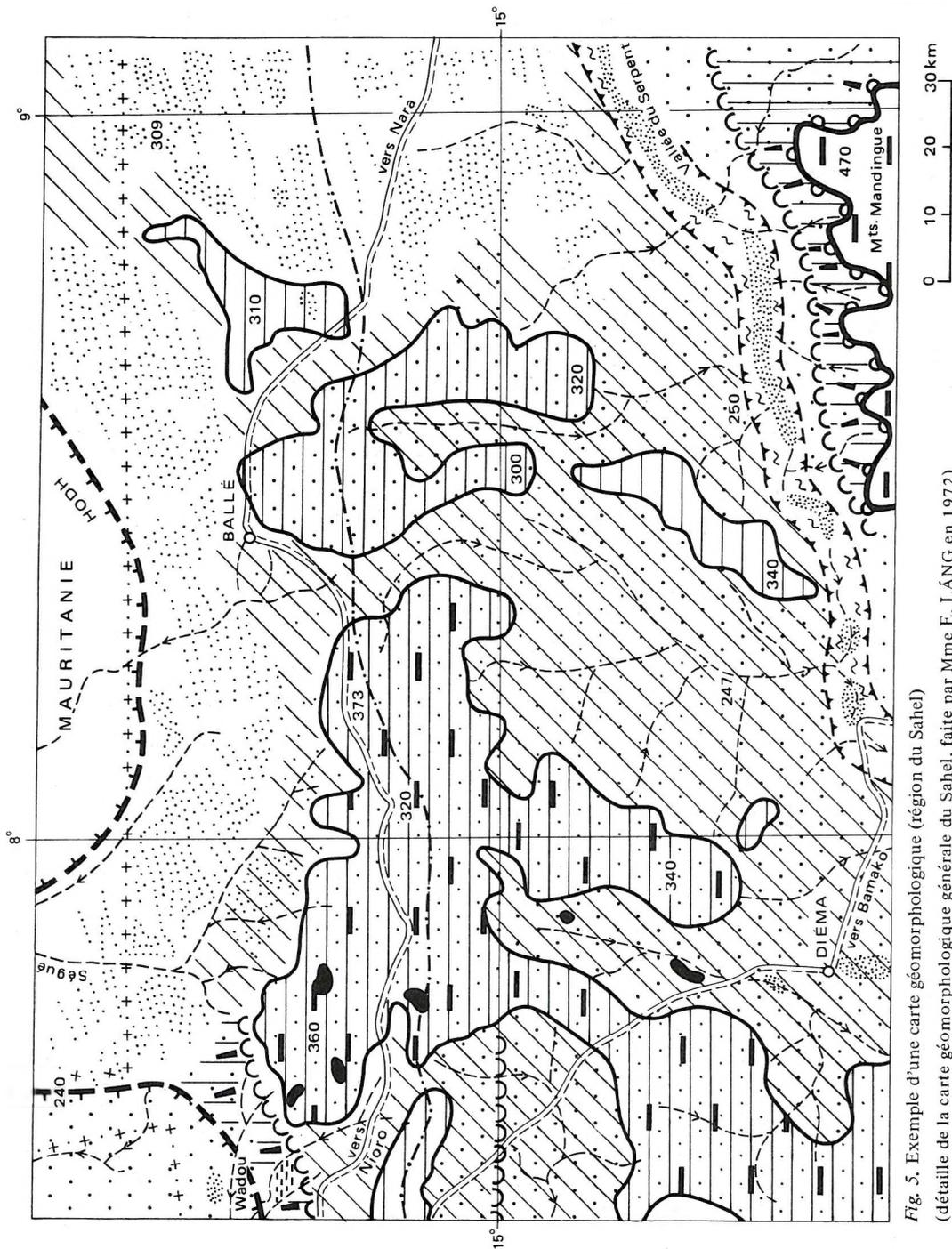


Fig. 5. Exemple d'une carte géomorphologique (région du Sahel)
 (détaille de la carte géomorphologique générale du Sahel, faite par Mme E. LÁNG en 1972)

FORMES DE DENUDATION

-  plate-forme résiduelle, en position intermédiaire, silicifiée (moyen-glacis)
-  plate-forme résiduelle, en position abaissée par l'érosion
-  piedmont
-  escarpement de dénudation
-  limite de la plate-forme gréseuse (haut-glacis du Plateau Mandingue) à cuirassement et à sols ferrallitiques fossils
-  butte constituée de dolérites (dénudation sélective)

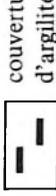
FORMES D'ACCUMULATION

-  limite de la zone d'accumulation (d'origine néo-tectonique) - „playa”
-  terrain dunaire moins dénudé, constitué de dunes longitudinales fixées
-  terrain dunaire dénudé, désorienté
-  dunes marginales récentes
-  couverture sablonneuse éolienne, plus ou moins épaisse, sans structure apparente

FORMES HYDRO-EOLIENNES

-  cours d'eau temporaires
-  ligne de crête
-  terrasse fluviatile (Holocène inférieur)
-  couverture éluviale (débris de grès, d'argilites, de dolérites, etc.)
-  couverture déluviale (sur le piedmont)

LITHOLOGIE

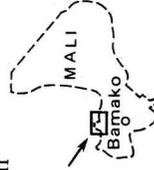


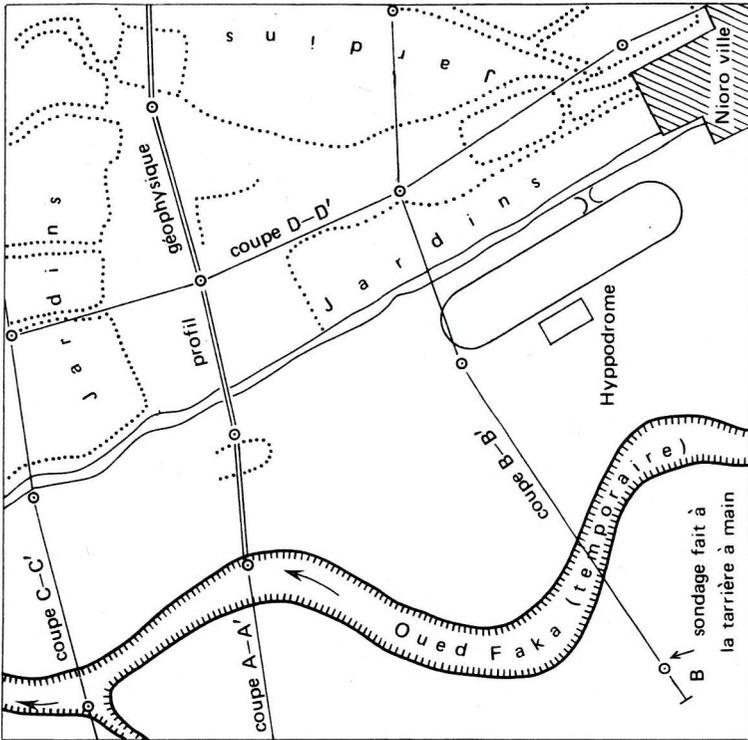
AUTRES SIGNES

240 point côté

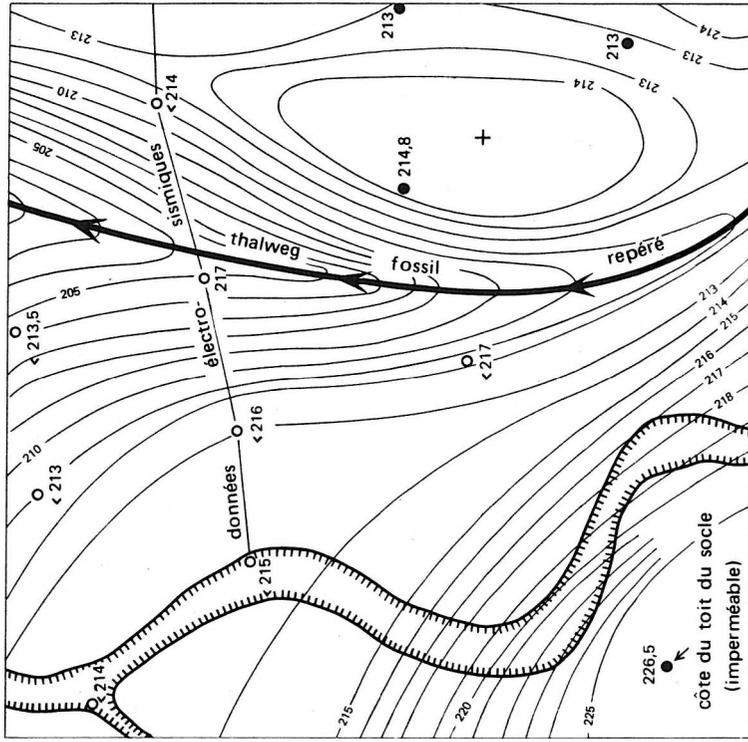


+ . + . + frontière du Mali

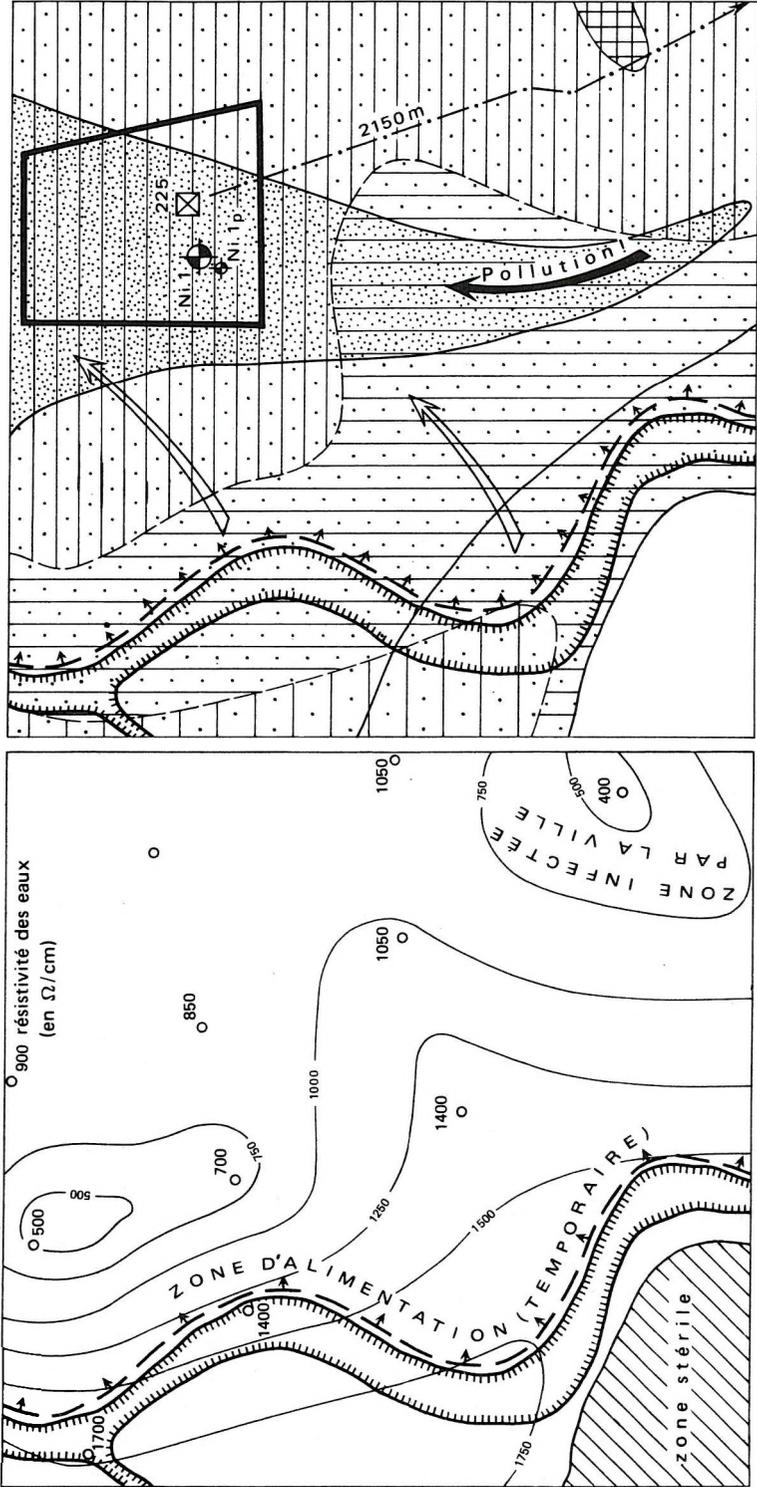




6a



6b



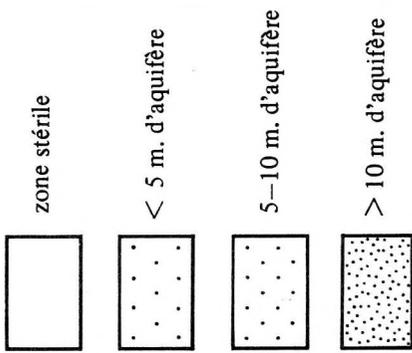
6e

6f

Fig. 6a-f. Carte hydrogéologique faite dans un cas concret (ville de Niolo du Sahel)
Travaux de M. BRO et G. LANG, faits dans le cadre du Projet des Nations Unies.

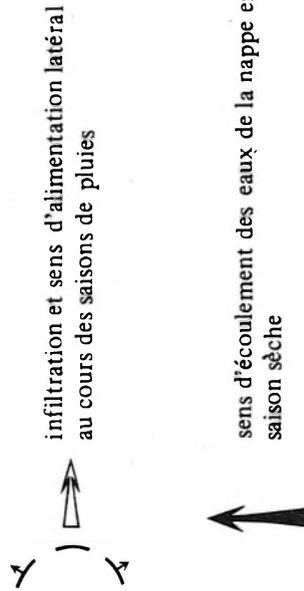
Légende de l'esquisse hydrogéologique 6f

1. Aquifères

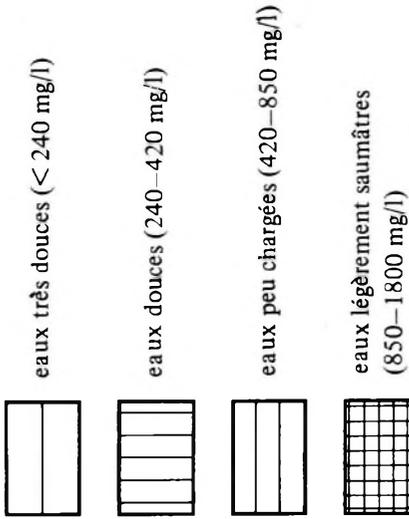


nappe
continue
et
permanente
du cône
d'éjection
fossil

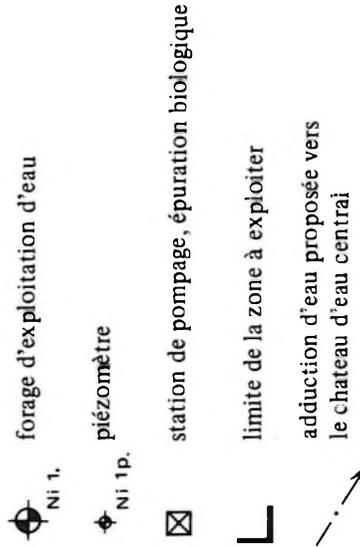
3. Infiltration, alimentation



2. Résidu sec des eaux



4. Propositions d'aménagement



I.

Séries sédimentaires intra-(1) et péri-(2) cratoniennes du Paléozoïque.

1. Géosynécise de Taoudennit

marin-continental  Carbonifère

marin {  Dévonien

{  Cambró-Ordovicien

{  Cambrien

 2. Zone „tassilienne”

II.

Soubassement sédimentaire du Précambrien supérieur (600–1.000 M.A)

 faciès des talus épicontinentaux

 faciès profonds (des bassins)

III.

Soubassement cristallin

 série „rajeunie” (dans la zone mobile principale)

 cratogenèse de 600 M. A. env' (à proximité de la zone mobile)

 cratogenèse éburnéenne ou antérieure (> 2.000 M.A.)

 formations cristallines couverte par des séries post-paléozoïques

IV.

 affleurements principaux des dolérites (permiennes)

V.

Traits structuraux

Couverture de plateforme (s. l.)

 zone mobile principale (limite du craton de l'Ouest-africain)

 zone mobile secondaire intra-cratonienne

 zone mobile secondaire péri-cratonienne

 limite de subsidence des bassins du Précambrien supérieur

 zone faillée des mouvements alpins initiaux

 dépression néo-tectonique

 frontière du Mali



TABLE DES MATIERES

I. Préface	3
II. Introduction	4
III. Generalités choisies	9
1. Climat	9
2. Voies de communication	10
IV. Géographie physique	11
1. Réseau hydrographique	11
2. Régions naturelles	12
3. Géomorphologie	13
V. Aperçu géologique	15
VI. Activité des experts hongrois, résultats	18
1. Système des recherches géologiques et hydrogéologiques au Mali (fin 1972)	18
2. Moyens de mise en oeuvre	19
3. Campagnes effectuées, principaux résultats	20
VII. Ressources en eaux souterraines reconnues	26
1. Systèmes aquifères proprement dits	26
2. Accumulations d'eau locales	28
3. Problèmes d'exploitation des nappes	28
Bibliographie fondamentale	29

* * *

Underground Water Research Done by Hungarian Experts in a Semi-arid Tropical Country (Republic of Mali, West Africa, 1962-1972).	30
Abstract	30
Principal ground water resource systems established	32
1. Regional aquifers	32
2. Local accumulations of subsurface and ground water	33

Kiadja a Magyar Állami Földtani Intézet
Felelős kiadó: Dr. Konda József
Készült a Magyar Állami Földtani Intézet nyomdájában
Terjedelem: 5,2 A/5 ív – Példányszám: 250 – Engedélyszám: 99305/75
Felelős vezető: Balogh Ernő