

Christian Seignobos et Olivier Iyébi-Mandjek (dir.)

## Atlas de la province Extrême-Nord Cameroun

IRD Éditions

---

# Hydrogéologie

Michel Detay

---

DOI : 10.4000/books.irdeditions.11553

Éditeur : IRD Éditions

Lieu d'édition : IRD Éditions

Année d'édition : 2005

Date de mise en ligne : 18 juillet 2017

Collection : Atlas et cartes

ISBN électronique : 9782709922920



<http://books.openedition.org>

### Référence électronique

DETAY, Michel. *Hydrogéologie* In : *Atlas de la province Extrême-Nord Cameroun* [en ligne]. Marseille : IRD Éditions, 2005 (généré le 07 mai 2019). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/irdeditions/11553>>. ISBN : 9782709922920. DOI : 10.4000/books.irdeditions.11553.

---

Ce document a été généré automatiquement le 7 mai 2019. Il est issu d'une numérisation par reconnaissance optique de caractères.

---

# Hydrogéologie

Michel Detay

---

- 1 La carte hydrogéologique a pour but de mettre clairement en évidence la nature respective des aquifères, leurs ressources en qualité et en quantité, leur profondeur sous le sol et les possibilités de captage, en distinguant les régions à réservoir généralisé et celles qui en sont dépourvues. Elle représente les caractères de l'aquifère le plus proche de la surface du sol, qui correspond à la première nappe couramment dénommée nappe phréatique.
- 2 Les thèmes cartographiés sont géologiques, géomorphologiques, géophysiques, hydrogéologiques et hydrologiques.
- 3 La nature lithologique des aquifères est cartographiée au moyen de figurés conventionnels.
- 4 Les courbes isopièzes ont été tracées à partir des données de puits et de forages. La piézométrie de la nappe du Chari-Tchad a été obtenue par krigeage de 204 niveaux piézométriques relevés sur le terrain.
- 5 Les résultats présentés proviennent d'une analyse statistique d'environ 1200 forages et plus de 2 000 études hydrogéologiques et géophysiques réalisées dans cette zone<sup>1</sup>. Les zones bleues correspondent à un secteur d'aquifère généralisé et une simple reconnaissance de terrain permet d'obtenir un ouvrage productif (90 % à 100 % de réussite). Les zones rouges couvrent les secteurs où l'aquifère est discontinu et où il convient de réaliser des études approfondies pour trouver des ressources en eau souterraine (40 % à 60 % de réussite). Les zones blanches correspondent à des secteurs intermédiaires où une étude hydrogéologique permettra de trouver des ressources en eaux souterraines (60 % à 90 % de réussite).
- 6 La limite d'influence de l'alimentation par sous-écoulement des terrains quaternaires de la « zone mixte » au sud du grand cordon dunaire a été cartographiée de même que la ligne de partage des eaux souterraines provenant des Mandara et du Logone.
- 7 Les précipitations efficaces correspondent à la fraction de celles qui échappent à l'évapotranspiration réelle pour ruisseler directement vers la rivière ou, indirectement, après avoir transité dans le terrain, à l'échelle locale<sup>2</sup>.

- 8 Les précipitations sont celles fournies depuis l'origine des stations jusqu'à 1974 inclus, par l'Asecna. Cette étude a été faite pour 146 stations (BOURGEOIS, 1980-81). L'analyse de photographies aériennes et de l'interprétation de l'imagerie satellitale a fourni la répartition des failles.
- 9 Quant à la géologie, nous avons différencié les gneiss, les granites, les schistes et les formations volcaniques. Il faut considérer ces termes comme des formations au sens large et dans l'optique d'une application hydrogéologique.
- 10 La « zone mixte » est limitée entre les isobathes du toit du socle - 15 et - 60 m.
- 11 Les nappes sédimentaires : nappe du Chari-Tchad, du Logone, du Bec-de-Canard, etc., font partie d'un seul et même ensemble qui a été arbitrairement découpé pour les commodités de l'exposé.
- 12 Le grand cordon dunaire Limani-Yagoua coupe le nord du Cameroun en deux sur 180 km. Sa base est à 320 mètres d'altitude alors que le niveau actuel du lac en étiage est approximativement à la cote 283 m. Que ce cordon soit ou non un témoin de l'extension du lac Tchad au Quaternaire récent, il n'en est pas moins un bon repère topographique de terrain et c'est dans cette optique que nous l'avons représenté.

## Les données générales

### Cadre géologique

- 13 L'Afrique centrale est constituée d'un socle précambrien sur lequel reposent en discordance des formations sédimentaires subhorizontales mésozoïques et cénozoïques. Le Paléozoïque y est peu développé. Des accidents profonds affectent le socle et la couverture sédimentaire et guident, notamment au Tertiaire et au Quaternaire, un volcanisme généralement basaltique (CORNACCHIA et DARS, 1983). Dans les formations du socle on distingue, au Cameroun, un complexe de base métamorphique, généralement migmatisé et granité et des formations de plate-forme, solidaires du complexe sous-jacent, plissées, peu ou pas métamorphisées.
- 14 Le complexe de base est un assemblage d'éléments géologiques divers qui n'ont en commun, pour la plupart, que d'avoir été repris par l'orogénèse panafricaine (BESSELES et TROMPETTE, 1980).
- 15 De nombreuses formations et complexes se sont succédé, entrecoupés de phases orogéniques importantes.
- 16 L'Afrique centrale, caractérisée par une émergence généralisée, affirmée depuis le Cambrien terminal, montre une couverture sédimentaire pelliculaire recouvrant un socle précambrien profondément arasé et pénéplanisé. Le Paléozoïque n'est représenté que par quelques rares lambeaux de séries continentales conservées au sein de structures effondrées. Au Primaire et vraisemblablement au début du Secondaire, ces épisodes orogéniques font place à une longue période de repos. Celle-ci a pour trait distinctif un intense démantèlement des formations précambriennes sous l'action de l'érosion. Au Quaternaire, l'histoire géologique du Nord-Cameroun est étroitement liée à celle de la cuvette centrale du lac Tchad. Les dépôts sont sous la dépendance d'une succession de régressions et de transgressions provoquées par l'alternance de périodes arides et pluviales.

## Tectonique et cadre structural

- 17 Les grandes directions structurales rencontrées au Nord-Cameroun sont :
- N 12° E
  - N 28° E : ligne du Cameroun
  - N 58° E : direction somalienne
  - N 73° E : ligne de l'Adamaoua
  - N 117° E
  - N 135° E à 142° E : direction érythréenne.
- 18 Ces directions contrôlent les plissements des roches cristallophylliennes, les failles, le réseau hydrographique, l'emplacement des appareils volcaniques et subvolcaniques et des massifs intrusifs post-tectoniques ultimes. La plupart sont très anciennes, ont été réactivées au cours de l'évolution géologique locale (LE MARÉCHAL, 1976) et permettent d'intégrer le cadre structural du Nord-Cameroun dans un contexte global.
- 19 Au Cameroun, les accidents ont fonctionné en décrochement dextre ; les reconstitutions palinspathiques montrent une coïncidence étroite entre les failles reconnues au Cameroun et le faisceau d'accidents décrochants du Brésil (TORQUATO et CORDANI, 1981). Comme le font remarquer J.-C. SIBUET et J. MASCLE (1978), les structures camerounaises sont dans l'exact prolongement de la faille transformante d'Ascension.
- 20 Les mouvements horizontaux sont vraisemblablement en relation avec les modalités d'ouverture de l'océan Atlantique. Selon M. CORNACCHIA et R. DARS, 1983, jusqu'au Crétacé inférieur, seule fonctionne la partie septentrionale de la ride médio-océanique ; il en résulte une composante horizontale vers l'est ne s'exerçant que sur le compartiment septentrional de l'Afrique situé au nord du golfe de Guinée. La partie médiane du continent est alors le siège d'une distorsion importante se traduisant par un décrochement potentiel dextre (shearing zone). La coïncidence de cette zone de tension avec les paléostructures panafricaines du Cameroun facilite une réactivation des principales lignes structurales.

## Hydrogéologie du socle

- 21 Avant 1970, l'alimentation en eau des villages en zone de socle ne se faisait qu'à partir des eaux superficielles ou au moyen de puits traditionnels, peu profonds et de gros diamètre, ou de puisards le plus souvent creusés dans les mayos.
- 22 Le socle cristallin précambrien et les formations infracambriennes et primaires se caractérisent par la présence d'un aquifère discontinu, lié à l'altération et à la fracturation. Le socle « sain » est stérile et il convient de trouver des zones correspondant à des « anomalies » qui peuvent se révéler aquifères.
- 23 Les formations du socle sont caractérisées par la succession altérites, socle fissuré, socle sain.
- 24 Produits de décomposition du socle, les altérites peuvent ou non contenir des cuirasses latéritiques. Leur composition est à dominante argileuse et de ce fait leur faible perméabilité joue le rôle de réservoir capacitif. Leur épaisseur est fonction d'un grand nombre de paramètres dont les principaux sont liés à la paléopluviométrie, à la position morphologique et à l'état de fissuration et de fracturation du socle sous-jacent.

- 25 Cette couche a une épaisseur comprise entre 0 et 50 mètres, sa perméabilité est très réduite (de l'ordre de  $1,10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) et la nappe se montre sujette à de très fortes variations de niveau. Les puits encore utilisables pendant la saison sèche donnent des débits généralement inférieurs à  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$  (parfois inférieurs à  $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ ). Les ressources en eau sont souvent déficitaires par rapport aux besoins.
- 26 Sous les altérites, on passe progressivement au socle par le biais d'un front d'altération. Le front d'altération dépasse rarement 30 à 40 mètres d'épaisseur. Il correspond à un socle intensément fissuré et fracturé, phénomène lié en grande partie à la décompression superficielle et à la tectonique régionale.
- 27 Les rochers dégradés et les zones fissurées constituent un aquifère plus important que les altérites. Leur perméabilité se révèle en moyenne dix fois plus élevée. Les variations saisonnières de niveau demeurent modestes (1 à 5 mètres) et les débits moyens fournis par les forages sont de l'ordre de  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Cet aquifère est en général exploitable entre 20 et 80 mètres de profondeur. Les fissures se refermant progressivement en profondeur, le milieu devient stérile. Ce n'est que le long d'accidents majeurs que les forages de plus de 100 mètres trouvent une justification.
- 28 Le socle est considéré généralement comme sain au-delà de cette limite, sauf cas particuliers liés à l'existence de fractures majeures qui l'auraient affecté au-delà de la couche d'altérites sur plus 30 à 40 mètres (épaisseur de la zone fissurée).
- 29 En milieu cristallin, les fonctions capacitives et conductrices coexistent au sein de chaque niveau aquifère, le milieu altéré étant essentiellement capacitif et le socle stricto sensu à tendance conductrice marquée. Le modèle conceptuel d'aquifère de socle généralement admis est constitué d'un recouvrement semi-perméable (réservoir d'altérites), surtout capacitif et alimenté par la surface, surmontant un aquifère de fissures ou de failles (socle stricto sensu), captif, drainant la couverture, à fonction essentiellement conductrice.
- 30 En simplifiant, on peut dire que l'hydrogéologie du socle se trouve conditionnée par les relations qu'entretiennent les altérites (à rôle essentiellement capacitif) et la zone fissurée, qui sert de drain à ce réservoir. Les fractures drainent la zone fissurée et ceci de manière hiérarchisée suivant leur importance et leur position morphologique.
- 31 La probabilité de trouver de l'eau dépend alors de différents facteurs : la géométrie de l'aquifère, la longueur et la densité du réseau de fracturation, la lithologie du socle et enfin la géomorphologie du site même.
- 32 Bien que la perméabilité des altérites soit très réduite, cet aquifère contient presque la totalité des réserves en eau souterraine et réalimente les fissures. Le rôle des altérites saturées est donc primordial. Plus la couverture saturée est continue et puissante, plus la probabilité de trouver de grandes quantités d'eau dans les fissures du socle est très élevée.
- 33 Longueur et densité du réseau de fracturation représentent des paramètres importants reconnus dès 1967 (BOLOGNINI et MOUTON, 1967). Une classification des fractures par rapport à leur intérêt hydrogéologique a été tentée dans le Nord-Cameroun (CIEH, 1978-1979). On admet une importance prioritaire pour les accidents multikilométriques et pour les points nodaux (points d'intersection de plusieurs fractures). Les failles à caractère régional peuvent présenter une argilification très développée du rocher et rendre imperméable les fractures jusqu'à des profondeurs supérieures à celles acceptables pour les recherches hydrogéologiques villageoises (50 à 100 mètres).

- 34 Des corrélations statistiques entre les débits de forages et les lithotypes du socle ont été mises en évidence sur des stratotypes par J. MOUTON, 1971. Les productivités des aquifères de socle (*lato sensu*) ont pu faire l'objet de classification (DETAY, 1987). Les plus productifs sont bien entendu les calcaires métamorphiques avec plus de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  dans 50 % des cas, suivis des granites et des gneiss ( $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  dans 50 % des cas) et des schistes argileux ( $1 \text{ à } 2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ).
- 35 Le site du village (en crête, sur un versant, dans un bas-fond), l'importance du bassin versant amont, la présence de cours d'eau, les possibilités d'existence d'une nappe de sous-écoulement, etc., constituent naturellement des facteurs déterminants. En première approximation, si on admet la superposition des bassins versants hydrologiques et hydrogéologiques, il est possible de délimiter l'aire de drainage d'une fracture, ou d'estimer l'aire d'alimentation d'un point d'eau.
- 36 Les quelques éléments précédemment cités, le domaine de pluviométrie, le type de climat, etc., sont autant d'indices pour l'évaluation quantitative des réserves utiles et la possibilité de trouver des ressources d'eau exploitables par forage. La distribution et les caractéristiques du réseau hydrographique renseignent aussi sur l'importance de l'altération et sur la possibilité de rencontrer des réserves d'intérêt.
- 37 Ainsi, de simples considérations géomorphologiques permettent de garantir un débit minimum de  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  dans 65 % à 80 % des cas en zone métamorphique ; dans 50 % à 60 % des cas en zone cristalline. L'emploi systématique de la photointerprétation garantit la même gamme de débits jusqu'à 90 % des cas en zone métamorphique et jusqu'à 75 % des cas en zone cristalline, les études géophysiques pouvant améliorer ultérieurement ces résultats.
- 38 Il faut noter que, dans des ouvrages de type hydraulique villageoise où le débit recherché est de  $0,7 \text{ à } 1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , le forage a souvent été arrêté, dès que le débit utile du forage est atteint, avant d'avoir exploité la totalité des ressources de l'aquifère.
- 39 Selon les données de 503 forages réalisés dans le socle de l'Extrême-Nord, la profondeur moyenne des forages est de 44,3 m. L'analyse de 243 essais de débits mesurés dans les gneiss, 224 dans les granites, 15 dans les schistes et 18 dans le socle volcanique donne les résultats suivants :

TABLEAU I. Tableau récapitulatif des débits obtenus dans les formations du socle du nord du Cameroun (d'après M. DETAY, 1987)

	Effectif		Débit moyen		Écart-type
( 1)	$\text{m}^3$ .				$\text{h}^{-1}$
G	n	e	i	s	s
2	4	3			

- 40 Pour les débits spécifiques, les effectifs sont beaucoup plus faibles que les précédents car les données des essais de pompage restent relativement rares et les essais par paliers stabilisés ne sont pas systématiquement demandés par les maîtres d'œuvre. D'une manière générale, les débits spécifiques ( $Q_s$ ) ont des valeurs inférieures à  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ .

- 41 Avec 117 observations dans les gneiss, 7 ont un  $Q_s$  supérieur à  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ . Avec 100 observations dans les granites, 3 ont un  $Q_s$  supérieur à  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ . Avec 9 observations dans le socle volcanique, aucune n'a un  $Q_s$  supérieur à  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  ; il en est de même pour les schistes.

TABLEAU II. Tableau récapitulatif des débits spécifiques obtenus dans les formations du socle au nord du Cameroun (d'après M. DETAY, 1987)

m	Effectif			$\Omega$	n	Écart-type
(			$\text{m}^3$	e		$\text{h} \cdot \text{m}^{-1}$
1)						
G	n	e	i	s	s	

- 42 La position du niveau piézométrique et les relations qu'il entretient dans l'espace avec les différents réservoirs contribuent largement à la connaissance de l'aquifère de socle. Les niveaux piézométriques apparaissent, en moyenne, à des profondeurs plus importantes dans les roches volcaniques (8,19 m) et les schistes (7,16 m) que dans les granites (5,68 m) et les gneiss (6,22 m). L'analyse de la position du niveau piézométrique dans les différents réservoirs montre que sur 282 observations, 132 dans le cas des gneiss (86 %) et 150 (82 %) pour les granites, le niveau piézométrique est localisé dans le réservoir d'altérites.

## Hydrogéologie de la plaine quaternaire

- 43 La plaine quaternaire camerounaise s'étend depuis le pied des monts Mandara jusqu'au lac Tchad ; elle appartient à une vaste unité géographique que l'on retrouve au Tchad, au Nigeria et au Niger. Elle est recouverte en grande partie par un manteau alluvionnaire hérité, dénommé comblement tchadien.
- 44 En bordure des monts Mandara, la puissance des dépôts est faible et le recouvrement sédimentaire augmente du sud vers le nord et de l'ouest vers l'est.
- 45 Le comblement quaternaire, de par sa composition sableuse d'origine sédimentaire, est aquifère. Il a fait l'objet de nombreux travaux qui nous ont amenés à envisager son étude sous la forme de plusieurs sous-unités.
- 46 Cette différenciation opère à partir de considérations d'ordre géomorphologique, géologique et hydrogéologique, puis plus spécifiquement, en fonction des axes d'alimentation qui conditionnent la recharge, la pérennité et l'extension des nappes.
- 47 Deux domaines caractérisent le comblement quaternaire, eux-mêmes subdivisés classiquement en plusieurs nappes :
- le domaine du Logone-Tchad comprend les nappes du Chari-Tchad, du Logone inférieur et du Bec-de-Canard ;
  - la zone de transition se subdivise en nappes de la plaine de Mora, du Nord-Diamaré, et de Kar-Hay.

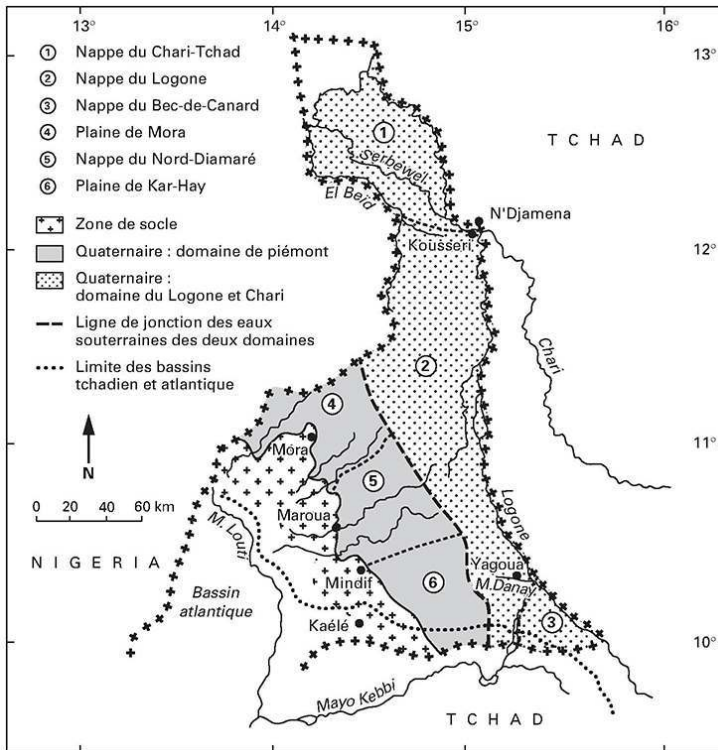


FIGURE 1. Les grandes unités hydrogéologiques du bassin quaternaire de l'Extrême-Nord (d'après M. DETAY, 1987)

- 48 Le comblement est assez uniforme dans son ensemble, même si l'épaisseur et la granulométrie de certains niveaux varient de manière conséquente. Le Quaternaire récent comprend :
- les alluvions argilo-sableuses et sablo-argileuses du Logone et de ses affluents et celles des rivières temporaires qui se déversent dans le mayo Kebbi et le lac Tchad ;
  - les alluvions grossières, avec blocs, des rivières orientales issues des monts Mandara ;
  - les argiles lacustres et limons qui forment la partie supérieure de la plaine tchadienne ;
  - les sables éoliens qui constituent des dunes constamment remaniées et le cordon dunaire Limani-Yagoua.
- 49 Le Quaternaire ancien est représenté par plusieurs dizaines de mètres d'alternance d'argiles et de sables en couches et lentilles discontinues.
- 50 Le Pliocène supérieur est constitué de 100 à 200 mètres d'argiles versicolores blanches, beiges, vertes ou bleutées, admettant quelques passées sableuses, et le Pliocène inférieur de 50 à 80 mètres de couches à prédominance sableuse avec intercalations d'argiles.
- 51 Le Continental terminal présente une série à prédominance détritique avec des passées sableuses qui se distingue de la précédente par la présence d'oxydes de fer dans les sables et par une cimentation plus ou moins accusée pouvant donner des grès. Les argiles intercalées dans les sables et les grès deviennent souvent prédominantes à la partie inférieure de cet étage qui atteint 200 à 400 mètres.
- 52 Le Continental hamadien n'a pas été reconnu avec certitude au Cameroun, seul le forage de Ngodeni (1003 m) dépasse le Continental terminal et recoupe des formations qui lui sont attribuables.



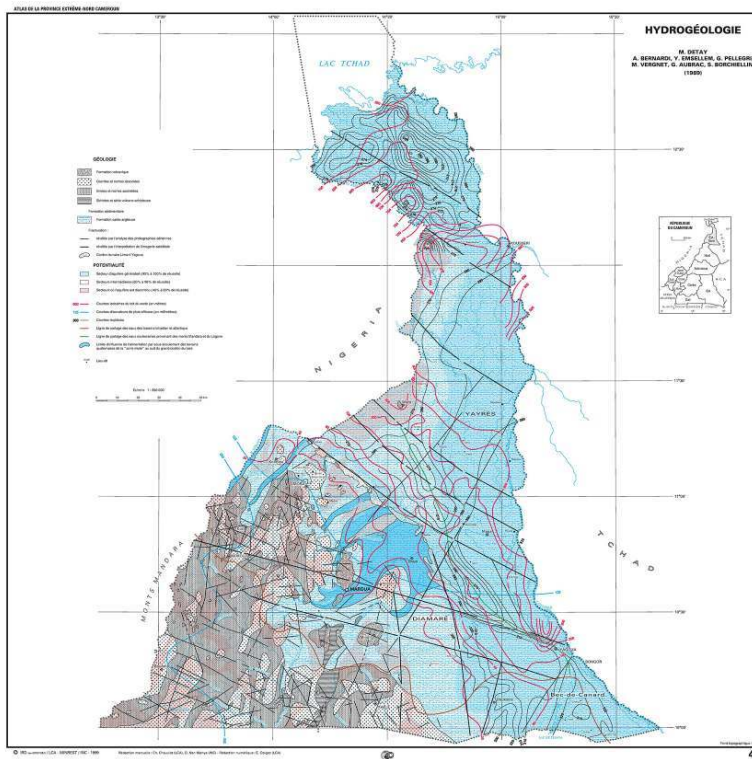
- 53 Cette description sommaire montre la complexité relative des aquifères. La nappe des terrains quaternaires désigne aussi bien les sables éoliens et les alluvions récentes dont l'épaisseur et la granulométrie varient beaucoup, que les couches et lentilles sableuses du Quaternaire ancien. Dans la nappe du Pliocène inférieur, les sables de base sont souvent mal séparés des sables et grès du Continental terminal. Dans la nappe du Continental terminal, la mieux individualisée compte tenu de l'épaisseur de la série, la pression de l'eau est probablement assez voisine d'une lentille à l'autre.
- 54 Nous envisagerons successivement les deux grands ensembles : le domaine du Logone-Tchad et le domaine de piémont avec, à chaque niveau, les caractéristiques hydrogéologiques des entités considérées.

## Le domaine du Logone-Tchad

### La nappe du Chari-Tchad

- 55 La nappe du Chari-Tchad à l'extrême nord appartient, du point de vue administratif, au département du Logone-et-Chari. Plus précisément, elle est localisée au nord du 12<sup>e</sup> parallèle, limitée à l'est par le fleuve Chari, à l'ouest par l'El Beïd, et au nord par le rivage du lac Tchad. Sa limite sud, plus arbitraire, correspondrait à un axe d'alimentation de la nappe générale.
- 56 Cette région est d'une monotonie remarquable. La pente, en direction du lac Tchad, n'enregistre que 0,011 %, les cotes au sol passant de 292 m à 283 m sur une distance de 80 km. Dans un contexte géologique de type sédimentaire, l'hydrogéologie se trouve largement conditionnée par l'hydrologie de surface.
- 57 Cette unité géographique est recoupée par trois voies d'eau, vestiges d'un vaste delta au débouché du lac Tchad.
- 58 Le Chari, qui est de très loin le fleuve le plus important, participe pour 95 % à l'alimentation du lac Tchad ; le Serbéwel et le El Beïd étant eux-mêmes des défluent du Chari. L'El Beïd amorce son cours dans la région de Kala-Kafra par débordement du Logone et tire ses eaux des zones inondées. Son débit est relativement faible. Durant la saison sèche, l'écoulement superficiel n'a évidemment plus lieu, et son lit se réduit à un alignement discontinu en mares.
- 59 Le Serbéwel se sépare du Chari à 18 km à l'aval de Kousseri. Abstraction faite des méandres, sa longueur est d'une centaine de kilomètres. Son régime a été très perturbé depuis 1984 en raison des travaux d'aménagement de la route Maltam-Kousseri. En étiage, il y a équilibre altimétrique entre le plan d'eau du lac Tchad et le plan d'eau du Chari au niveau où le Serbéwel prend naissance.
- 60 Le lac Tchad, d'une superficie sensiblement égale à 20000 km<sup>2</sup>, oscille entre une altitude de 282 et de 283 mètres. La pluviométrie annuelle moyenne sur le plan d'eau est estimée à 330 mm correspondant à un apport de six milliards de mètres cubes d'eau. L'apport des fleuves reste bien sûr largement prédominant avec quarante milliards de mètres cubes dont 95 % proviennent du seul Chari. Le lac est en constante régression<sup>3</sup>.
- 61 Du point de vue géologique, nous nous trouvons dans les horizons quaternaires du bassin sédimentaire du lac Tchad. Ceux-ci ont une épaisseur variable oscillant entre 30 et 50 m. Sur le plan minéralogique, les sables sont constitués de grains de silice souvent associés à de la muscovite en fines paillettes.

- 62 Les horizons superficiels ont été subdivisés par J. PIAS et E. GUICHARD (1957, 1958), en :
- bourrelets dunaires ;
  - alluvions récentes sablo-limoneuses et argilo-limoneuses localisées le long des cours d'eau et des bas-fonds inondés durant la saison des pluies ;
  - sables anciens d'origine lacustre ;
  - argiles lacustres noires.
- 63 Une campagne géophysique menée par le bureau d'études Lerici en 1966 a mis en évidence le substratum résistant à une profondeur de 600 à 700 m.



- 64 Les données de forage utilisables concernant cette région étaient en 1988 au nombre de 77. La profondeur moyenne des ouvrages est de 43,5 m avec un écart-type de 9,31. Les forages se révélèrent positifs dans 94 % des cas et leur débit supérieur à  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  dans 82 % des cas ; le débit moyen des forages est de  $9,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .
- 65 Les débits spécifiques sont relativement élevés avec une moyenne de  $2,75 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  et un écart-type de 3,16 pour 54 forages. Il apparaît que les débits spécifiques sont très élevés, avec des valeurs supérieures à  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  ; une exploitation plus intensive des ouvrages serait envisageable.
- 66 Les analyses réalisées montrent que la composition chimique de l'eau est très variable bien que l'homogénéité et la continuité de la nappe soient incontestables sur toute l'étendue de la zone étudiée. Les diagrammes semi-logarithmiques classiques, établis en fonction des teneurs en Ca, Mg, Na, Cl,  $\text{SO}_4$  et  $\text{CO}_3$ , ne montrent pas de parenté entre les différents échantillons analysés. La salinité totale est très variable et des études visant à suivre les variations de salinité de l'eau le long de certains filets de courant, depuis l'axe d'alimentation jusqu'au centre des dépressions, ont montré une distribution anarchique des valeurs. Cette particularité est à mettre au compte d'un mode de sédimentation deltaïque où les dépôts se succèdent de façon discontinue, au gré des transgressions et régressions successives des eaux du lac Tchad.

- 67 Au cours des phases d'émersion s'élaboraient localement des sols halomorphes caractérisés par un excès de Na fixé sur le complexe absorbant. Cet excès est dû, pour une part, aux apports des zones plus hautes et, pour une autre part, à l'évaporation des remontées capillaires pendant la saison sèche. Ce phénomène provoque également une concentration des carbonates calciques et sodiques dans la partie supérieure de ces sols, accompagnée localement d'une précipitation de sulfates et de chlorures. Les eaux superficielles ne pénétrant pas dans le sol, le caractère d'halomorphie se précise avec le temps. On peut ainsi expliquer les minéralisations exceptionnelles de certaines eaux par le lessivage de tels paléo-sols interstratifiés dans les dépôts fluvio-lacustres superficiels.
- 68 Les données thermométriques des eaux superficielles ont été relevées systématiquement dans le courant du mois d'avril 1964 sur 85 puits de la région. Elles représentent une moyenne mensuelle de 32,4° C et une moyenne interannuelle de 28,1° C. Toutes les températures mesurées sont comprises entre 27,5° C et 30,2° C. La moyenne arithmétique, égale à 29,1° C, est nettement inférieure à la température de l'air.
- 69 Les facteurs qui jouent sur la température de l'eau mesurée dans les puits sont difficiles à mettre en évidence. Selon B. TILLEMENT (1970), le gradient géothermique semble intervenir dans la mesure où la température augmente en même temps que la profondeur du toit de la nappe sous la surface du sol.
- 70 On remarque que ces mêmes zones correspondent au centre des dépressions piézométriques. L'action de l'évapotranspiration a peut-être pour effet d'augmenter la température de la tranche d'eau superficielle au centre des dépressions. Il faut noter que tous les puits mesurés ne sont pas soumis aux mêmes conditions de prélèvement et que l'incidence du puisage ayant précédé l'échantillonnage a des conséquences sur la température relevée.
- 71 La compilation des données de 204 puits et forages, grâce à l'utilisation du krigeage, nous a permis de tracer les courbes isopièzes statistiquement les plus probables de la nappe du Chari-Tchad. Il a été considéré que l'alimentation de la nappe se faisait uniquement par infiltration à partir des axes d'alimentation Serbéwel, El Beïd, Chari et le lac Tchad, les terrains superficiels étant imperméables. La recharge de la nappe est liée aux crues des cours d'eau. Ces dernières interviennent en novembre ; à cette époque, les berges sont immergées sur une hauteur de six à sept mètres au-dessus de la cote d'étiage.
- 72 Il apparaît que le toit de la nappe est subaffleurant en bordure des plans d'eau superficiels et s'enfonce dans les interfluves pour atteindre une profondeur maximale de 27 m. Les filets de courant provenant des différentes zones d'alimentation convergent pour donner des dépressions fermées, matérialisées sur la carte par des courbes isopièzes qui se referment sur elles-mêmes. Ces interfluves, subcirculaires ou elliptiques, sont localisés entre les axes d'alimentation. On note trois dépressions, localisées dans les interfluves, où les courbes se referment sur elles-mêmes : l'une entre Chari et Serbéwel, les deux autres entre Serbéwel et El Beïd.
- 73 On ne dispose malheureusement pas de mesures, couvrant une longue période, d'un niveau statique qui nous permettraient d'appréhender le battement de la nappe, ce secteur étant inaccessible pendant la saison des pluies. Une étude systématique durant la saison sèche a cependant pu être réalisée ; elle a mis en évidence une oscillation de quatre mètres d'amplitude maximale entre le début et la fin de la saison sèche.
- 74 L'analyse des coupes de forage laisse apparaître une augmentation de l'épaisseur du premier niveau sableux d'ouest en est, qui est à mettre en relation avec les apports des

fleuves lors du Quaternaire récent. Le Chari représentant de très loin le plus gros apport, les niveaux sableux ont nécessairement été plus importants dans sa zone d'épandage.

### La nappe du Logone inférieur

- 75 La plaine du Logone est limitée à l'est par le Logone, au nord par l'axe El Beïd-Kousseri. À l'ouest, elle est confinée géographiquement par la frontière avec le Nigeria et, géologiquement, son extension est restreinte par un remplissage argileux au sein des sédiments quaternaires ; enfin, au sud-ouest, elle est limitée par le système dunaire. La plaine du Logone, qui s'étend au Cameroun, sur 250 km, bénéficie d'un climat soudanien assorti d'affinités sahéliennes vers le nord. La saison sèche commence au début du mois d'octobre et se termine vers la fin du mois d'avril ou le début du mois de mai.
- 76 Cette région, relativement plate, est constituée de yayrés, vastes territoires périodiquement inondés par les crues du Logone et où l'eau stagnait pendant cinq à sept mois, avant les installations de la Semry à Maga en 1979 et les périodes de stress climatiques antérieurs et postérieurs.
- 77 La plaine, entièrement constituée de dépôts alluvionnaires argilo-sableux quaternaires, présente une pente moyenne sud-nord de l'ordre de 1/6 000. Le réseau hydrographique de cette région s'ordonne autour du Logone inférieur qui, de Bongor à Kousseri, présente toute une série de défluent au tracé plus ou moins bien défini, qui servent de collecteurs aux eaux d'inondation. Les autres éléments de l'hydrographie de la plaine sont : le lac de Fianga, partagé par moitié entre le Cameroun et le Tchad ; les cours inférieurs et terminaux des grands mayos descendant des monts Mandara ; et le Kalia qui prend naissance au nord de Waza et se jette dans l'El Beïd à la latitude de Kousseri.
- 78 Le comblement fluvio-lacustre quaternaire de la plaine du Logone ne diffère de celui de la région Chari-Tchad que par la présence de séquences sableuses à granulométrie légèrement supérieure. Cinq sondages profonds ont été exécutés en 1967 et deux en 1987 (tableau III).

TABLEAU III. Caractéristiques synthétiques des forages profonds réalisés dans la plaine du Logone (d'après DETAY, 1987)

Sondages en mètres)	Profondeur du socle	Nature du socle
W	a	z
2	5	0
s	é	r
t	o	s
h	i	c
t	e	s
e		t

- 79 Il apparaît toutefois très difficile d'établir une stratigraphie<sup>4</sup> compte tenu des fréquentes fluctuations du plan d'eau du lac Tchad qui ont fait alterner les périodes de dépôt limnique avec des périodes d'émersion au cours desquelles se sont produits des

phénomènes pédogénétiques particuliers (formation de concrétions calcaires et de sols alcalins). Par ailleurs, la pertinence des horizons proposés dans les niveaux quaternaires est amoindrie par la monotonie des dépôts, l'absence de couches repères et les variations latérales de faciès.

- 80 Les données de forage utilisables concernant cette région sont au nombre de 137. La profondeur moyenne des forages est de 43,4 mètres avec un écart-type de 13,4. Les forages ont été positifs dans 90 % des cas et leur débit s'est révélé supérieur à  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  dans 60 % des cas ; valeur relativement faible compte tenu du caractère quasi continu de la nappe. Le débit moyen obtenu est de  $5,35 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .
- 81 Les débits spécifiques utilisables sont au nombre de 90 avec une moyenne de  $2,09 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  et un écart-type de 3,52.
- 82 L'étude des résistivités mesurées dans les puits<sup>5</sup> permet de constater une diminution très approximative en se déplaçant du Logone vers l'ouest. En outre, elle a permis de mettre en relief quelques irrégularités intéressantes :
- dans la dépression de Gavra-Barkaya, le creux de la nappe est souligné par des résistivités faibles ;
  - au sud-ouest de Guirvidig, des valeurs de  $2000 \text{ ohms} \cdot \text{cm}^{-1}$  à  $3000 \text{ ohms} \cdot \text{cm}^{-1}$  indiquent une alimentation à partir des eaux superficielles du mayo Tsanaga ;
  - entre Pouss et Mazera, de faibles résistivités témoignent de terrains argileux peu perméables ;
  - l'axe de drainage ouest-est situé au nord du parc de Waza est souligné par des résistivités fortes indiquant des terrains perméables.
- 83 La majorité des eaux relèvent du type carbonaté calcique, comme la plupart des eaux souterraines du Nord-Cameroun, avec un enrichissement possible en sodium, croissant notamment d'est en ouest. Il est intéressant de noter que les eaux superficielles sont de même « faciès », mais avec des minéralisations plus faibles. D'une manière générale, les eaux ont une minéralisation moyenne, comprise entre  $300 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  et  $800 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ .
- 84 L'alimentation de la nappe phréatique s'effectue à partir du lit du Logone et de ses défluent à l'est ; de l'ouest viennent les apports des eaux de ruissellement des monts Mandara, par l'intermédiaire des mayos qui se perdent dans les yayrés au-delà de la dune Limani-Yagoua.
- 85 Les mayos, défluent du Logone inférieur, participent à l'alimentation de la nappe et constituent des axes secondaires : lac de Fianga, mayo Danay, etc., les nappes de sous-écoulement de la zone mixte se transformant en systèmes d'alimentation de la nappe générale. Le mélange des eaux souterraines venues des monts Mandara avec celles en provenance du Logone se produit suivant une ligne orientée NNO-SSE, grossièrement parallèle à la dune Limani-Yagoua, correspondant à une zone déprimée du toit de la nappe générale (étude BRGM, 1968-69).
- 86 On note aussi la présence de zones déprimées localisées loin des zones d'alimentation. Par ailleurs, l'existence de quelques nappes perchées, superficielles, de faible extension, a été observée dans certains secteurs. Leur mise en valeur ne présente que peu d'intérêt dans la mesure où elles tarissent pendant la saison sèche.

## La nappe du Bec-de-Canard

- 87 Dans cette petite langue de terre, relativement plate, comprise entre le Logone à l'est, les prolongements du lac de Fianga à l'ouest et la frontière tchadienne au sud, une première reconnaissance de la nappe a été réalisée en février 1965. Elle a permis de localiser 75 points d'eau répartis sur une superficie de 750 km<sup>2</sup> et de tracer les premières courbes isopièzes.
- 88 La plaine du Bec-de-Canard a pour origine, comme celles du Logone et du Chari-Tchad, l'accumulation de dépôts quaternaires sur une pénéplaine cristalline sous-jacente.
- 89 Les données de forage utilisables concernent 36 ouvrages. La profondeur moyenne des forages est de 42,8 mètres avec un écart-type de 7,4. Les forages ont tous été positifs et 92 % ont un débit supérieur à 1 m<sup>3</sup>. h<sup>-1</sup>. Le débit moyen est de 8,78 m<sup>3</sup>. h<sup>-1</sup> sur un effectif de 35 ouvrages avec un écart-type de 5. Les débits spécifiques utilisables sont au nombre de 31, avec une moyenne arithmétique de 2,6 m<sup>3</sup>. h<sup>-1</sup>. m<sup>-1</sup> et un écart-type de 3,52.
- 90 Les eaux de la nappe du Bec-de-Canard sont du type carbonaté calcique avec une proportion importante de chlorures alcalins (TILLEMENT, 1970). Les résidus secs, déduits de la résistivité mesurée systématiquement sur chaque point d'eau ont une valeur oscillant entre 50 mg. l<sup>-1</sup> et 900 mg. l<sup>-1</sup>. La répartition des résidus secs sur le terrain permet de remarquer que les eaux issues du lac de Fianga sont plus chargées que celles issues du Logone. Il est vraisemblable qu'une concentration s'effectue par évaporation dans le lac.
- 91 Les températures s'échelonnent en février entre 24,7° C et 30,5° C. Celles relevées dans les nappes perchées sont notoirement plus basses et se rapprochent de celles des eaux de surface.
- 92 Les cotes piézométriques établies à partir des données de la reconnaissance de 1965, complétées et modifiées grâce aux nouvelles données, montrent que les deux principaux axes d'alimentation sont le lac de Fianga et le Logone. Les lignes de courant convergent vers la dépression fermée d'Orokna.
- 93 La morphologie de cette nappe, simple dans les trois quarts nord du Bec-de-Canard, se complique vers la frontière tchadienne :
- un ensellement au carrefour d'Ardaf correspond à la terminaison occidentale de l'axe d'alimentation de Bardouki au sud duquel on retrouve une zone déprimée centrée sur le village de Guiriou et se prolongeant vers le Tchad ;
  - au nord de l'axe de Bardouki, une zone de drainage orientée SE-NO constitue une apophyse vers le SE de la dépression d'Orokna ;
  - vers Dom-Pya, un axe d'alimentation venu du sud s'oriente au NO puis franchement à l'ouest ;
  - il existe probablement une petite zone de drainage, orientée SE-NO, sous les villages de Dom-Tchandoum et de Guirimi.
- 94 Ces diverses complications doivent correspondre à une alimentation locale que laissent supposer les valeurs très faibles des résidus secs au nord et nord-ouest de Dom-Pya, indiquant une faible migration des eaux.
- 95 Le gradient hydraulique est constant dans la partie nord de la nappe (0,12 % à 0,2 %) ; il est localement plus important (0,4 %) en bordure du lac de Fianga, pour s'atténuer rapidement vers l'est. L'existence de quelques nappes superficielles a également pu être

mise en évidence. Celles-ci n'ont le plus souvent que quelques dizaines de centimètres de profondeur et ne présentent que peu d'intérêt.

## Hydrologie synthétique du domaine Logone-Tchad

96 Le tableau IV résume les caractéristiques identifiées au sein de chacune des unités.

TABLEAU IV. Caractéristiques générales enregistrées dans les trois nappes formant le domaine du Logone-Tchad (d'après DETAY, 1987)

	Chari-Tchad	Logone	Bec-de-Canard
Résultats bruts			
V			
a	g	e	s
i			n
é	r	s	e
é			s
5		9	,
0			0
1			0
,			6
0			0
2		8	,
0			0
N	o	m	b
t			r
a			e
d			t
f			r

- 97 La nature du comblement du domaine du Logone-Tchad est, au sens large, relativement homogène et les variations latérales de faciès restent localisées, tout au moins pour les nappes du Chari-Tchad et celles du Bec-de-Canard. Il apparaît que les neuf-dixièmes de la zone recouverte par ces alluvions renferment une nappe généralisée. Elle n'est discontinue que vers les monts Mandara où (par déficit d'alimentation) elle se limite aux nappes de sous-écoulement des grands mayos.
- 98 Sur le plan hydrogéologique, il ne convient pas de différencier les trois nappes (Chari-Tchad, Logone, Bec-de-Canard). Leurs caractéristiques hydrodynamiques sont sensiblement les mêmes. Elles restent tributaires de l'épaisseur des horizons sableux, de l'existence de passées argileuses, et de la proximité d'un axe d'alimentation.
- 99 La distribution des zones argileuses et la piézométrie de la nappe sont bien connues. Les implantations de futurs ouvrages de captage devront s'intéresser à la proximité d'une zone d'alimentation et à la probabilité de recouper une bonne épaisseur de sables aquifères, paramètre qui reste, dans certaines zones, difficile à appréhender, étant donné le mode de sédimentation.



## Le domaine de piémont

- 100 Le domaine de piémont (au sens hydrogéologique du terme) correspond à une plaine sédimentaire formée par l'accumulation de produits arrachés aux monts Mandara sous l'action d'une intense érosion fluvio-torrentielle. Le transport de ces produits s'effectue grâce à une douzaine de paléo-rivières saisonnières qui ont déposé leurs sédiments dans l'ancienne plaine cristalline constituant le soubassement de toute cette région.
- 101 Le domaine de piémont se subdivise classiquement en : plaine de Mora, plaine du Nord-Diamaré et plaine de Kar-Hay.
- 102 Le domaine de piémont présente la zone la plus complexe de l'hydrogéologie de l'Extrême-Nord.
- 103 En 1970, B. Tillement, qui s'intéresse à la zone de piémont stricto sensu, considère qu'elle n'est discontinue qu'en bordure des monts Mandara où elle se trouve limitée, par déficit d'alimentation, aux nappes de sous-écoulement des grands mayos. La faible extension latérale des nappes de sous-écoulement délimite de grandes zones stériles dans les interfluves. Toutefois, on a pu mettre en évidence, à faible profondeur, de nombreuses petites nappes superficielles de dimensions restreintes, le plus souvent saisonnières.
- 104 En 1984, le bureau d'étude Arlab décèle une zone de transition située entre les contreforts des monts Mandara en bordure du bassin quaternaire où le socle est peu profond et les horizons sableux se terminant en biseau sur le toit du socle. Conventionnellement, ce secteur de transition a été délimité entre les isobathes du toit du socle 20 m et 60 m (BERNARDI et al., 1985 et 1987).
- 105 En 1985 fut introduite la notion de « zone mixte » ; elle redéfinit les limites possibles du secteur et met en évidence des affinités comparées de comportement hydrodynamique observées entre des sous-unités de la zone mixte et des unités voisines. Cette notion s'intéresse à la justification de l'existence de caractéristiques hydrodynamiques propres aux différents forages localisés dans la zone mixte et introduit une approche probabiliste.
- 106 La comparaison des débits moyens et des débits spécifiques moyens fait ressortir des affinités de comportement entre les différentes formations. Ainsi, les formations du recouvrement sédimentaire et des gneiss ont, sur le plan des débits, un comportement de socle et, sur le plan des débits spécifiques, celui d'une formation sédimentaire. Pour leur part, les granites ont, globalement, un comportement de formation sédimentaire et les formations de socle indifférencié celui du socle (DETAY, 1987).
- 107 Du point de vue des limites, la zone mixte correspond ici à un volume défini en surface par la frange de recouvrement sédimentaire quaternaire, horizon - 10 mètres, jusqu'à la zone sédimentaire épaisse (horizon - 60 mètres). Ces frontières correspondent, en limite supérieure, à la valeur approchée de l'épaisseur moyenne d'altération en fonction du gradient pluviométrique. La limite inférieure correspond à une profondeur, jugée maximale, de réalisation acceptable d'un forage mixte supposé intéresser le socle. Par ailleurs, la profondeur maximale enregistrée du niveau piézométrique se situe à 45 mètres.



## La plaine de Mora

- 108 La plaine de Mora assure le passage entre le comblement quaternaire sédimentaire et le socle. Située au sud du 12<sup>e</sup> parallèle, au pied des monts Mandara, elle recoupe, du point de vue administratif, les deux départements du Mayo-Tsanaga, du Logone-et-Chari et du Diamaré. Elle correspond à une zone cristalline pénéplanisée, partiellement recouverte de sédiments. La puissance du recouvrement sédimentaire peut atteindre une quarantaine de mètres ; entre Kourgui et Limani, elle passe de 0 m à 40 m en 18 km. Il faut noter qu'à une pente de 0,5 % de la surface topographique correspond une pente de 0,2 % du soubassement cristallin.
- 109 La plaine de Mora est recoupée par cinq mayos principaux : les mayos Kérawa, Ngassawé, Sava, Mangafé et Ranéo ; tous prennent leur source dans les monts Mandara. La pluviométrie moyenne estimée des bassins versants des mayos est de 800-850 mm par an. L'écoulement des mayos est intermittent durant les mois de mai, juin et septembre, pratiquement permanent au cours des mois de juillet et d'août, et ininterrompu pendant une période se prolongeant d'octobre à mai. Les cours d'eau de la plaine de Mora se caractérisent donc par un régime sahélien, avec un amoindrissement rapide des débits de l'amont vers l'aval durant la saison des pluies.
- 110 La plaine quaternaire se raccorde aux monts Mandara par une rupture de pente très marquée. En bordure des montagnes, où la couverture est très faible, il est difficile de faire la distinction entre les produits de décomposition du socle, in situ ou peu transportés, et les alluvions provenant du lessivage des monts Mandara. L'importance du recouvrement sédimentaire augmente lentement lorsqu'on s'éloigne des massifs montagneux. On observe quelques pointements du socle dans la plaine, soit sous forme d'inselbergs (rochers de Gréa, Waza, montagne de Doulo, Séra-Warda, Djaoudé, soit sous la forme de petits chaos granitiques peu importants (NO et SE de Djoundé, Haïssa-Hardé). Dans la région de Kolofata, le socle devient subaffleurant.
- 111 Les différents pointements de socle montrent une assez grande diversité de nature pétrographique : diorites à Doulo ; granite à riebeckite à Gréa ; granite d'anatexie à Kolofata ; syénites et trachytes à Waza ; granite calco-alcalin à biotite de Djoundé, Djaoudé, Séra-Warda et Mémé. L'examen d'un très grand nombre de coupes de sondages permet de dégager les principales caractéristiques du recouvrement alluvionnaire : extrême hétérogénéité ; termes détritiques variés (des sables hétérométriques aux cailloutis) ; sables riches en feldspaths ; alluvions pratiquement toujours chargées en argiles ; absence de niveaux repères. Toute corrélation entre forages, même très rapprochés, s'avère impossible.
- 112 Ces observations sont vraisemblablement à mettre en relation avec le mode de sédimentation ayant présidé au remplissage de la plaine, qui fut caractérisé par un déplacement latéral continu du lit des mayos. Dans les premiers mètres des alluvions, nous avons pu remarquer la présence de concrétions carbonatées d'origine pédologique, précipitées lors des remontées d'eau capillaire chargée en sels au cours des saisons sèches. À la base, le passage au « socle sain » se fait insensiblement avec un enrichissement fréquent des argiles en paillettes de muscovite et de biotite légèrement altérée. Au nord du grand cordon dunaire, il ne s'agit plus de dépôts fluvio-torrentiels mais de dépôts essentiellement lacustres dans lesquels dominent de puissantes assises d'argiles franches ou peu sableuses.

- 113 Les eaux apparaissent peu à moyennement minéralisées. Résultat du contact prolongé de l'eau avec les sédiments encaissants, la minéralisation croît d'amont en aval et du lit du mayo vers les bordures latérales de la nappe. Les eaux carbonatées calciques ou sodiques présentent une teneur constante en silice ; les sulfates, chlorures et nitrates sont peu abondants.
- 114 Dans la zone montagneuse, en raison de la faiblesse de la couverture altérée, les eaux météoriques ruissellent sans s'infiltrer. L'infiltration aura lieu dans la plaine, à travers les lits des mayos, donnant naissance à des nappes de sous-écoulement caractéristiques de ce secteur. L'alimentation des nappes, dans la plaine, demeure sous la dépendance du volume d'eau infiltrée à partir des mayos. Celui-ci sera d'autant plus important que la perméabilité et la puissance des alluvions formant le lit seront favorables. Le développement des alluvions augmente régulièrement de l'amont vers l'aval, les quantités d'eau infiltrées devenant de plus en plus importantes à mesure que l'on s'approche de la grande dune Limani-Yagoua. D'une façon générale, l'alimentation suit une extension latérale, de part et d'autre des berges d'un mayo, de l'ordre de 3 km. Parmi les mayos traversant la plaine de Mora, seuls ceux de Kolofata et de Doulo induisent des nappes de sous-écoulement discontinues ; les trois autres possèdent des nappes de sous-écoulement continues.
- 115 Au passage du cordon dunaire, les mayos imprègnent les sables éoliens de la dune et disparaissent peu à peu. La nappe se généralise et on définit une zone de transition plus ou moins parallèle à la dune, large de 5 km à 15 km, où de vastes zones stériles alternent avec des secteurs d'aquifère généralisé. À l'aval de cette unité, on aboutit à la nappe générale du Logone. À côté de ce système aquifère principal, on rencontre également de petites nappes superficielles, le plus souvent en relation avec le réseau hydrographique, piégées dans des paléo-chenaux sableux. Ce sont de petites nappes de faible extension soumises à une intense évapotranspiration et qui, le plus souvent, tarissent à la fin de la saison sèche.

### La nappe du Nord-Diamaré

- 116 La nappe du Nord-Diamaré, ainsi désignée par C. DASSIBAT (1967) en raison de sa caractéristique d'aquifère généralisé, induit une solution de continuité entre les nappes de sous-écoulement des mayos Tsanaga, Motorsolo et Boula. Cette unité « présente des caractères hydrogéologiques différents sans pourtant qu'une modification quelconque puisse s'observer dans le paysage lui-même » (TILLEMENT, 1970).
- 117 Cette plaine subhorizontale avec une pente de 0,2 % s'étend des pieds des monts Mandara jusqu'au cordon dunaire Limani-Yagoua. Le socle (rocher de Balda, dôme de Djoulgouf) apparaît peu et s'enneige avec une pente plus importante que dans le secteur de Mora. Trois mayos recoupent cette plaine, du sud-ouest vers le nord-est : Tsanaga, Boula et Motorsolo. La pluviométrie du bassin versant qui les alimente oscille autour de 900 mm par an. Les phénomènes d'érosion concomitants ayant donné naissance aux sédiments de la nappe du Nord-Diamaré, leur puissance croît régulièrement des monts Mandara vers le Logone. De ces mayos, seule la Tsanaga draine un bassin versant important, de 600 km<sup>2</sup> ; à Maroua, son bassin atteint 1 282 km<sup>2</sup> grâce à l'appoint apporté par le mayo Kaliao.
- 118 Le mode de gisement des alluvions de la plaine Maroua-Bogo s'apparente à celui de la plaine de Mora, la couverture alluvionnaire y est cependant légèrement plus importante.

Ces alluvions proviennent du lessivage des monts Mandara et se sont déposées au Quaternaire récent sur la pénéplaine longeant le paléo-Tchad. Les éléments les plus grossiers ont sédimenté dans les lits mineurs et dans les défluent, alors que les éléments fins se concentrent dans les zones de débordement. Ainsi on rencontre, au sein des séries argileuses des interfluves, des lentilles et des chenaux de sables grossiers correspondant à d'anciens lits de mayos et qui, lorsqu'ils reçoivent une bonne alimentation, constituent d'excellents réservoirs aquifères.

- 119 Les eaux carbonatées calciques ou sodiques présentent une remarquable similitude de faciès. Les taux en Ca et en Na sont assez voisins et les sulfates se signalent par des teneurs variables. Il n'y a que peu ou pas de chlorures et la silice reste abondante. Les pH avoisinent la neutralité.
- 120 En 1954, une étude de l'Orstom a estimé le volume d'eau écoulée par le Tsanaga à Maroua à 338 mm<sup>3</sup> par an. À Bogo, 32 km en aval, celui-ci n'est plus que de 300 mm<sup>3</sup>. Les 38 mm<sup>3</sup> déficitaires, déduction faite du volume évaporé, profitent à la nappe en s'infiltrant à travers le lit du mayo. L'allure générale de la surface piézométrique montre que la nappe est alimentée presque exclusivement à partir des trois grands mayos auxquels se joint le mayo Balda. À l'aplomb de ces mayos, la nappe est subaffleurante. Les populations riveraines de ces mayos s'alimentaient à des puisards sommaires creusés dans le sable des lits mineurs. C'est encore le cas aujourd'hui, mais de façon moins systématique. Toutefois, une grande partie de l'exhaure pour le bétail se fait là, à l'aide d'abreuvoirs lenticulaires de 4 à 5 m de diamètre. On note cependant quelques zones longtemps réputées stériles correspondant à la remontée du socle : la région de Balda, le dôme de Djoulgouf et la région de Doubbel. Comme dans la plaine de Mora, les nappes superficielles, de faible extension et d'intérêt réduit, perchées au-dessus de la nappe générale, sont nombreuses et éparpillées dans l'ensemble de la région.

### La plaine de Kar-Hay

- 121 Cette unité a peu de points communs avec les deux précédentes ; elle présente en revanche une parenté plus marquée avec les unités typiquement sédimentaires. Située au sud-est de la nappe du Nord-Diamaré et limitée au nord par la dune Limani-Yagoua, elle se caractérise par l'absence de pointements du socle ; c'est une zone sédimentaire dont la puissance augmente lentement d'ouest en est et du sud au nord. Entre Gaban et Ndoumga, par exemple, elle passe de 7 m à 20 m sur 28 km.
- 122 La plaine de Kar-Hay est une zone relativement plate. Un système de petites dunes rouges du type de celles que l'on rencontre à Kalfou double le grand cordon dunaire. Ces dunes, orthogonales au cordon, forment des bandes régulières, parallèles entre elles, larges de 0,5 km à 1,5 km, séparées par des dépressions périodiquement inondées. Leur altitude ne dépasse pas 15 mètres. D'après G. SIEFFERMAN et M. VALLÉRIE (1963), cette disposition particulière correspondrait au façonnement de petites dunes éoliennes à partir de larges placages sableux qui se seraient déposés pendant la phase désertique juste antérieure à la grande crue du lac, dont l'extension maximale avec ses complexes marécageux serait matérialisée par le cordon dunaire Limani-Yagoua. Ce dernier se serait ainsi surimposé au système des dunes rouges du type Kalfou. Sur le plan hydrographique, cette région demeure caractérisée par l'absence de mayos importants.

- 123 Des analyses effectuées par B. TILLEMENT, 1970, montrent que les eaux sont moyennement minéralisées, titrant entre 300 mg. l<sup>-1</sup> et 600 mg. l<sup>-1</sup> de résidus secs. Elles présentent un caractère basique affirmé, le pH oscillant entre 7,2 et 7,6.
- 124 À l'est de la péninsule à montinsules Kaélé-Mindif, se trouve une zone de socle subaffleurant et stérile. Ce bombement cristallin passe progressivement à la plaine de piémont où l'eau est en relation avec les quelques petits mayos dont le cours disparaît avant de passer à la nappe généralisée. Dans cette unité, l'influence de l'infiltration directe des eaux durant la saison des pluies a pu être mise en évidence par le battement important de la nappe observé d'une saison à l'autre.

## Hydrogéologie synthétique du domaine de piémont

- 125 La plaine de piémont est le siège d'un aquifère contenu dans les dépôts quaternaires argilo-sableux. La puissance des alluvions se trouve comprise entre 0 et 60 m. Les variations latérales de faciès, très fréquentes, font que la nappe est loin d'être continue. Elle peut faire totalement défaut, soit en raison d'une remontée du socle cristallin qui vient recouper la surface piézométrique théorique, soit à cause d'une sédimentation totalement argileuse. Ce secteur, caractérisé par la présence d'un « biseau sec » était considéré comme stérile sur le plan hydrogéologique. Cette configuration structurale, relativement classique, caractérise les limites de grands bassins sédimentaires (MATHIEZ et HUOT, 1966).

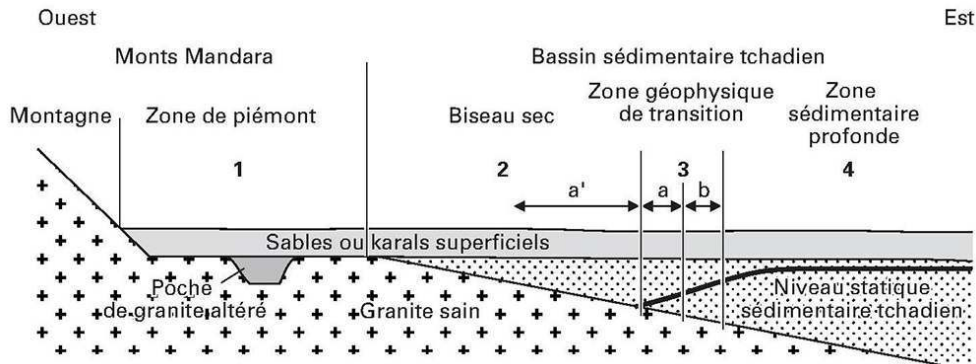


FIGURE 2. Zone mixte : coupe schématique à travers la structure du domaine de piémont (d'après MATHIEZ et HUOT, 1966, modifié)

126

- 127 Plusieurs sous-secteurs peuvent être distingués dans la zone mixte.

### Le « biseau sec » (zone 2)

- 128 Le « biseau sec » se situe en bordure des grands bassins structuraux, à la limite des affleurements du socle. Secteur stérile, les puits y rencontrent le substratum imperméable avant d'atteindre le niveau statique de la nappe sédimentaire.
- 129 Dans l'Extrême-Nord, le « biseau sec » se localise, a priori, dans un périmètre de 200 km de long sur environ 20 km de large. Celui-ci a été étudié en 1963-1964 (BRGM) par sismique de réfraction et sondages électriques. Ces études concernaient uniquement la zone de piémont où le toit du socle était considéré comme très irrégulier, oscillant entre 10 m et 80 m de profondeur.

- 130 Le long de la bordure ouest du bassin tchadien, les sédiments ont une vingtaine de mètres d'épaisseur et on y a décelé la présence d'un biseau sédimentaire sec compris entre la zone de piémont à l'ouest et l'intersection du niveau statique et du substratum cristallin à l'est. Cette zone de « biseau sec » est caractérisée par un recouvrement de résistivité comprise entre 20 Wm et 40 Wm.

### La zone géophysique de transition (zone 3)

- 131 Elle correspond à une bande de terrain où il existe une tranche humide, mais d'épaisseur insuffisante pour être détectée nettement en prospection électrique ou sismique, aussi les deux méthodes donnent-elles des résultats divergents quant à la profondeur du socle. Cette zone a pu être parfaitement délimitée grâce à la comparaison des résultats des deux méthodes puis au moyen d'un contrôle par forage qui a confirmé l'existence de cette bande où la nappe s'approfondit et s'amincit. Ainsi, une tranche sédimentaire humide, épaisse de 2 m à 5 m, se trouve directement au toit du substratum cristallin.
- 132 Cette zone peut, du point de vue géophysique, être divisée en deux parties :
- zone a : à l'ouest, la tranche humide, encore très mince, mais très difficilement détectable ;
  - zone b : la tranche humide s'épaissit vers l'est. Elle est décelable par géophysique électrique (apparition d'un conducteur intercalaire).

### La zone sédimentaire profonde (zone 4)

- 133 Vers l'est, le socle s'approfondit, le niveau statique remonte près de la surface et la tranche humide augmente considérablement d'épaisseur.
- 134 Le problème hydrogéologique revient alors à un problème de perméabilité lié à la nature de la sédimentation. Des corps argileux, très étendus et allant jusqu'au toit du substratum, peuvent exister, rendant stériles des secteurs importants.
- 135 Plus de 70 sondages électriques ont été réalisés pour étudier et cartographier la géométrie du socle dans la « zone mixte ». Conventiennellement, la zone de transition a été délimitée sur la carte de synthèse à 1/500 000 de A. BERNARDI et al. (1985) entre les isobathes du socle - 15 m et - 60 m.
- 136 Ces valeurs proviennent de l'analyse suivante :
- les épaisseurs moyennes de recouvrement (altérites) oscillent statistiquement dans la zone d'étude, entre 11 et 15 mètres. Ainsi, dans un contexte structural où le recouvrement est inférieur à 15 m, on peut assimiler ce secteur à un environnement de socle ;
  - dans un contexte sédimentaire, il devient extrêmement difficile de forer et tuber au-delà de 60 mètres de recouvrement, aussi avons-nous considéré la cote - 60 comme un maximum pour un forage dont l'objectif est de capter l'eau dans le socle.
- 137 L'aspect innovant a été de considérer partiellement la zone de transition comme un aquifère de socle. L'idée de l'existence possible d'une zone décomprimée et altérée, susceptible d'être aquifère au toit du socle, a permis d'envisager les potentialités de ce secteur.
- 138 Le problème était de cartographier le toit du socle et d'appréhender la piézométrie de la nappe généralisée. À ce stade, il devenait possible d'envisager une piézométrie potentielle dans le socle, suivant les schémas classiques de fermeture avec la profondeur des joints horizontaux, des joints secondaires, des joints principaux puis des accidents majeurs, etc.

- 139 La zone de transition s'est ainsi vue augmentée, à l'ouest de la tranche humide, d'une sous-partie là où le niveau piézométrique se localise dans la tranche décomprimée du toit du socle. Secteur jusqu'ici considéré comme stérile, où tous les puits, limités au recouvrement, s'avèrent improductifs.
- 140 Découverte d'autant plus importante que, de la même manière, dans la zone de piémont *strictosensu*, les axes d'alimentation induisent également des nappes de sous-écoulement. Ces derniers permettent une alimentation de la tranche décomprimée du socle qui devient de ce fait aquifère. La prise en compte de ces phénomènes permet d'estimer plus largement les ressources en eau.
- 141 À ce stade, la prospection géophysique apporte une aide précieuse. Grâce à elle, il a été possible de cartographier avec précision l'enfouissement progressif du toit du socle. Il convient, en effet, de considérer cette unité dans l'espace, en suivant la pente du socle et la proximité de la limite de la tranche humide. Ainsi apparaissent des périmètres entiers où il devient possible de trouver de l'eau. Des secteurs de grande étendue, réputés jusqu'alors stériles, peuvent être aquifères, notamment lors de la présence d'axes d'alimentation en zone de piémont.

TABLEAU V. Zone mixte : caractéristiques générales des sous-unités représentatives (d'après DETAY, 1987)

	Socle	Gneiss	Granites	Roche volcanique	Sédiment
Résultats bruts					
V		i			l
a	g	e	s		
i			n		t
é	r	e	s	s	
é		s			
1					1
,					0
0					
2		4		,	0
0					
3			2		
0					0
1					,
0					0
5		7		,	0
0					
N	o	m	b	r	e
t		o			t
a				l	

- 142 Le tableau V récapitule les caractéristiques générales des principaux traceurs pris en compte dans la zone mixte.
- 143 Toutes ces données ne peuvent pas, à elles seules, rendre compte du comportement de la zone mixte. Il apparaît que la multiplication des sous-unités conduit à l'obtention d'unités d'affinités mixtes et qui ne répondent plus à des critères hydrogéologiques précis. Les unités hydrogéologiques qui rendent compte au mieux, à notre sens, de la zone mixte sont d'une part l'unité sédimentaire et d'autre part l'unité de socle au sens large.

- 144 L'aquifère du sédimentaire quaternaire de la zone mixte correspond aux forages, localisés dans la zone mixte, qui n'ont intéressé que les horizons sédimentaires.
- 145 Le tableau V montre que les débits sont comparables à ceux obtenus dans le sédimentaire du Logone, bien qu'inférieurs, mais que, pour ces mêmes débits, la profondeur moyenne des forages est plus faible ; par ailleurs, les niveaux piézométriques oscillent tous dans les mêmes limites.

## Conclusion

- 146 Le domaine du Logone-Tchad a été envisagé sous la forme de plusieurs sous-unités, mais celles-ci constituent une seule et même nappe.
- 147 Deux systèmes d'alimentation ont été mis en évidence : les rivières et les mayos induisant des nappes de sous-écoulement.
- 148 On note une dépression de la surface piézométrique au nord du cordon dunaire Limani-Yagoua correspondant à la limite d'influence de ces deux modes d'alimentation (attestés par la chimie des eaux).
- 149 Une des découvertes importantes dans ce secteur a été la compréhension de la zone mixte et la possibilité de trouver des débits très intéressants dans le socle et la prise en compte de la possibilité d'alimentation par les nappes de sous-écoulement des mayos.
- 150 Les différentes études et campagnes géophysiques ont permis de connaître avec précision l'allure du toit du socle. La piézométrie de ce secteur a été reconnue avec plus ou moins de précision.
- 151 L'intégration de l'influence de l'alimentation par les mayos ou par la nappe générale, l'allure du toit du socle et la piézométrie dans l'aquifère quaternaire permet de localiser très précisément des ouvrages de captage avec un risque quasi nul d'échec.

---

## BIBLIOGRAPHIE

### Indications bibliographiques

- BERNARDI (A.), DETAY (M.), 1988 — Corrélations entre les paramètres géo-électriques et les caractéristiques hydrodynamiques des forages en zone de socle. *Hydrogéologie*, n° 4 : 245-253.
- BERNARDI (A.), DETAY (M.), GAUJOUS (D.), 1985 — *Carte de planification des ressources en eau de Nord Cameroun à 1/500000 (102000 km<sup>2</sup>)*. Yaoundé, ministère de l'Agriculture, Fonader.
- BERNARDI (A.), DETAY (M.), GAUJOUS (D.), 1987 — « Primi risultati di studi e perforazioni eseguita nel Camerun settentrionale ». Roma, XX<sup>th</sup> International Congress AIH, 14 p.

- BERNARDI (A.), MOUTON (J.), 1975 — « Recherche d'eau dans les formations cristallines et métamorphiques du socle africain ». International Congress of Hydrogeology, Porto Alegre (Brazil).
- BERNARDI (A.), MOUTON (J.), 1980 — Les recherches d'eau dans le socle africain - Apport de la géophysique. *Bull. BRGM*, section III, n° 4 : 293-309.
- BESSELES (B.), TROMPETTE (R.), 1980 — *La chaîne panafricaine, zone mobile d'Afrique centrale et mobile soudanaise*. Yaoundé, BRGM, Mémoire n° 92.
- BISCALDI (R.), 1968 — *Étude hydrogéologique de la nappe du Logone*. Yaoundé, BRGM, Rapport 68 YAO 003, carte à 1/100000, 45 p.
- BOLOGNINI (M.), MOUTON (J.), 1967 — « Méthodologie de la recherche d'eau en terrain cristallin ». Colloque AIH, Istambul.
- BOURGEAIS (M.), 1980 — Carte de planification des ressources en eau de Côte d'Ivoire, du Ghana, du Togo, du Bénin et du Cameroun. *Bull. BRGM*, section III, n° 4.
- CIEH, 1978-79 — Carte de planification des ressources en eau du Cameroun.
- CORNACCHIA (M.), DARS (R.), 1983 — Un trait structural majeur du continent africain. Les linéaments centrafricains du Cameroun au golfe d'Aden. *Bull. Soc. Géol. France*, t. XXV, n° 1 : 101-109.
- DASSIBAT (C.), 1967 — *Étude hydrogéologique des monts Mandara*. Yaoundé, Rapport de mission FED-BRGM, YAO 67 AC, 38 p.
- DETAY (M.), 1987 — « Prospection et identification des aquifères : Reconnaissances préliminaires et méthode d'implantation des ouvrages par étude de terrain et photointerprétation ». Session internationale de formation au Cefigre : *Exploitation et gestion des ressources en eau souterraine*.
- DETAY (M.), 1987 — *Identification analytique et probabiliste des paramètres numériques et non numériques et modélisation de la connaissance en hydrogéologie sub-sahélienne - Application au Nord-Cameroun*. Univ. de Nice, Thèse de doct. ès-sciences, 456 p., 5 annexes, 64 tableaux, 131 fig.
- DETAY (M.), 1988 — « Intelligence artificielle et systèmes experts ». Session internationale de formation : *De la collecte des données à la planification, la place de l'informatique*, Cefigre.
- DETAY (M.), GOULNIK (Y.), CASANOVA (R.), BALLESTRACCI (R.), 1986 — « Hydrolab : un système expert pour la recherche des eaux souterraines en Afrique ». Actes du 2<sup>e</sup> colloque international, Montpellier : *Eau, gestion des données et aide à la décision* : 94-99.
- DETAY (M.), éd., 1988-89 — Intérêt de la prospection géophysique. Exemple du Programme d'urgence d'hydraulique villageoise Nord-Cameroun. *Bull. CIEH*, n° 74-75, oct. 1988-janv. 1989 : 47-68.
- DETAY (M.), POYET (P.), 1988 — « Hydroexpert : un système expert en hydrogéologie de terrain ». Actes des communications scientifiques du salon Hydroplan : 191-195.
- DETAY (M.), POYET (P.), 1988 — Application de l'intelligence artificielle en hydrogéologie. *Géologues*, n° 85-86 : 41-47.
- DETAY (M.), POYET (P.), 1989 — Hydrolab : le système expert de l'hydraulique villageoise. *Bull. CIEH*, n° 76 : 25-41.
- DETAY (M.), POYET (P.), 1989 — « Development and evaluation of a field prototype expert system for village water supply programs ». International symposium on groundwater management : quality and quantity, Spain, Benidorm, october 1989.



- DETAI (M.), POYET (P.), EMSELLEM (Y.), BERNARDI (A.), AUBRAC (G.), 1989 — « Influence du développement du réservoir capacitif d'altérites et de son état de saturation sur les caractéristiques hydrodynamiques des forages en zone de socle cristallin ». Paris, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, série 2, vol. 309, n° 4 : 429-436.
- Géolab-Arlab, 1984-85-86-87 — *Programme d'urgence dans les provinces du Nord et de l'Extrême-Nord au Cameroun*. Yaoundé, ministère de l'Agriculture, 19 tomes.
- LE MARÉCHAL (A.), 1976 — *Géologie et géochimie des sources thermominérales du Cameroun*. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., n° 59, 176 p.
- MATHEZ (J. P.), HUOT (G.), 1966 — Prospection géophysique et recherche d'eaux souterraines. Exemple d'application en Afrique Occidentale. *Bull. CIEH*, juin.
- MILLOT (G.), 1964 — *Géologie des argiles*. Paris, Masson, 493 p.
- MOUTON (J.), 1971 — « Les eaux souterraines dans les formations cristallines et métamorphiques du socle africain. Résultat d'études en Afrique occidentale et en Afrique orientale ». Symposium internazionale sulle acque sotterranee nelle rocce cristalline, Cagliari.
- PIAS (J.), GUICHARD (E.), 1957 — « Origine et conséquence de l'existence d'un cordon sableux dans la partie sud-ouest de la cuvette tchadienne ». Paris, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. 244 : 791-793.
- PIAS (J.), GUICHARD (E.), 1958 — *Étude pédologique du bassin alluvionnaire du Logone-Chari(Nord-Cameroun)*. Yaoundé, Ircam, 304 p.
- POYET (P.), DETAI (M.), 1988 — « Enjeux sociaux et industriels de l'intelligence artificielle en hydraulique villageoise ». In : Convention I. A. 88, première conférence et exposition européenne sur les techniques et les applications de l'intelligence artificielle en milieu industriel, Éd. Scientifiques et Techniques Hermes, vol. 2 : 621-653.
- POYET (P.), DETAI (M.), 1988 — *Un système expert d'aide à l'implantation de forages enhydraulique villageoise - Manuel d'introduction et de référence*. Yaoundé, Inria, Rapport de Recherche n° 936, 38 p.
- POYET (P.), DETAI (M.), 1989 — Hydrolab, an example of a new generation of compact expert systems. Pergamon Press PLC, *Computers & Geosciences*, 15 (3) : 255-267.
- SCHNEIDER (J. L.), 1966 — *Carte hydrogéologique à 1/500000. Notice explicative de la feuille de Fort Lamy*. BRGM, Service de l'hydraulique du Tchad.
- SIBUET (J.-C.), MASCLE (J.), 1978 — Plate kinematic implication of atlantic equatorial fracture zone trends. *Journal of Geophysical Research*, vol. 83 : 3401-3421.
- SIEFFERMAN (G.), VALLÉRIE (M.), 1963 — *Carte pédologique du Nord-Cameroun à 1/100000. Notice de la feuille de Yagoua*. Yaoundé, Ircam, 79 p.
- TILLEMENT (B.), 1970 — Hydrogéologie du Nord-Cameroun. *Bull. Dir. Mines et Géol.*, Cameroun.
- TORQUATO (J. R.), CORDANI (U. G.), 1981 — Brazil Africa Geological Links. *Earth ScienceReviews*, 17 : 155-176.

## NOTES

1. Les forages ont été réalisés lors du Programme d'urgence du ministère de l'Agriculture où le bureau d'études Géolab-Arlab était ingénieur-conseil (1985).

2. La pluviométrie a été déterminée par bilans mensuels sur vingt années consécutives (1955-1974), à partir de la hauteur de pluie réellement tombée pendant le mois considéré et de l'évapotranspiration potentielle du lieu, calculée par la formule mensuelle de Turc.
  3. D'après J.-L. SCHNEIDER (1966), son extension il y a 6 000 ans était 16,5 fois supérieure et son niveau d'eau de 38 m supérieur au niveau actuel. Il atteignait alors une superficie d'environ 330000 km<sup>2</sup>.
  4. R. BISCALDI (1968) a tenté d'établir une stratigraphie des terrains superficiels et de définir une paléogéographie du Quaternaire récent de la plaine du Logone. Celle-ci a été réalisée en comparant 70 sondages d'une profondeur moyenne de 15 m dont 3 dépassent 40 m. Il a proposé une coupe-type pour le Quaternaire supérieur dans la région des yayrés. Ces différents termes se rapprochent de ceux décrits par J. PIAS et E. GUICHARD (1958) au nord du 12<sup>e</sup> parallèle.
  5. Les principales caractéristiques des eaux ont été acquises grâce à 45 échantillons analysés par le laboratoire de la direction des Mines et de la Géologie de Yaoundé.
- 

## AUTEUR

**MICHEL DETAY**

Sofia-Antipolis, Nice