

UNIVERSITE DE NEUCHÂTEL  
FACULTE DES SCIENCES

INSTITUT DE GEOLOGIE  
CENTRE D'HYDROGEOLOGIE

---

# Etude des Circulations Profondes dans le Grand Bassin Sédimentaire du Niger :

Identification des aquifères et compréhension de leurs fonctionnements

## THESE

Présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel

Pour l'obtention du Grade de  
DOCTEUR ÈS SCIENCES

Par

**Abdelkader DODO**

Ingénieur-géologue Dipl. Université de Genève

Hydrogéologue Dipl. Université de Neuchâtel

---

**Soutenue le 03 septembre 1992 devant le jury composé de :**

Professeur François Zwahlen, Université de Neuchâtel.	Directeur de Thèse
Professeur László Király, Université de Neuchâtel.	Co-Directeur de Thèse
Dr. Mahmaud Bouzelboudjen, Université de Neuchâtel.	Co-Directeur de Thèse
Professeur André Burger, Université de Neuchâtel.	Examineur
Professeur Jean Morgat, BRGM (Orléans, France).	Examineur
Professeur Jean-Charles Fontes, Université de Paris-Sud.	Examineur
Dr. Wilhelm Struckmeier, BGR (Hannovre, Allemagne).	Examineur

---

# IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

Etude des circulations profondes dans le .....  
grand bassin sédimentaire du Niger: .....  
Identification des aquifères et compréhension  
de leur fonctionnement. ....  
.....  
de Monsieur Abdolkader Dodo .....

---

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

FACULTÉ DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel  
sur le rapport des membres du jury,

Messieurs F. Zwahlen, A. Burger, L. Kiraly, .....  
M. Bouzelboudjen, J. Margat (Orléans), .....  
J.-Ch. Fontes (Paris) et W. Struckmeier (Hanovre)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 11 janvier 1993 .....

Le doyen :



A. Robert

## Liste des Thèses soutenues au Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel

1. **TRIPET Jean-Pierre (1972).** Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Arcuse. Thèse, Université de Neuchâtel, 183p. (13/12/1972).  
*Jury* : BURGER A., SCHAER J.-P., WALSER E.
2. **MISEREZ Jean-Jacques (1973).** Géochimie des eaux du karst jurassien. Thèse, Université de Neuchâtel, 313p., 60fig.  
*Jury* : KUBLER B., AUBERT D., BURGER A., FERNANDEZ J., STUMM W.
3. **JAMIER Denle (1975).** Etude de la fissuration, de l'hydrogéologie et de la géochimie des eaux profondes des massifs de l'Arpille et du Mont-Blanc. Thèse, Université de Neuchâtel, 153p., 44fig. (05/03/1975).  
*Jury* : BURGER A., OLIVE Ph., KIRALY L.
4. **MATHEY Bernard (1976).** Hydrogéologie du bassin de la Serrière et du Seyon. Thèse, Université de Neuchâtel, 324p.  
*Jury* : BURGER A., KIRALY L., JACKLI H., PALOC H.
5. **KIRALY László (1978).** La notion d'unité hydrogéologique. Essai de définition. Thèse, Université de Neuchâtel, 133p., 30fig.  
*Jury* : BURGER A., GRIZE J.-B., RECORDON E., SCHAER J.-P.
6. **MELLOUL Avi (1979).** Connaissance hydrogéologique des grands aquifères profonds en milieu poreux et à données peu nombreuses. Aquifères des grès nubiens du Sinaï et du Neguev. Thèse, Université de Neuchâtel, 268p. (juin 1979).  
*Jury* : BURGER A., CASTAGNY G., FONTES J.-C., KIRALY L.
7. **BALDERER Werner (1980).** Hydrogeologie des Murgtales (Kt. Thurgau). Tomes 1 et 2 manuscrit. Thèse, Université de Neuchâtel.  
*Jury* : BURGER A., KIRALY L., JACKLI H.
8. **PASQUIER Françoise (1986).** Hydrodynamique de la nappe du Gaeu (Cantons de Soleure et Berne). Thèse, Université de Neuchâtel, 169p., 59fig., 16tabl. (avril 1986).  
*Jury* : BURGER A., KIRALY L.,
9. **WITWER Caroline (1988).** Influence des conditions techniques et hydrogéologiques sur les périodes d'échantillonnage des eaux souterraines. Forages de Boettstein, Weiach, Riniken, Schafisheim, Kaistern, Lengern (Nord de la Suisse). Thèse, Université de Neuchâtel.  
*Jury* : BURGER A., KIRALY L., ZWAHLEN F.,
10. **SOUMA Gérard André Roberl (1989).** Trans 3 : Modèle numérique d'un transfert de masse et d'énergie conductif-advectif par éléments finis en une, deux et trois dimensions. (Programme d'ordinateur en Fortran 77). 17/05/1989. Thèse, Université de Neuchâtel, 178p., 49fig., 3ann. + listing du prog.  
*Jury* : BURGER A., KIRALY L., ZWAHLEN F., RAPPAZ J.
11. **THIERRIN Joseph (1990).** Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse occidentale). 22/10/1990. Thèse, Université de Neuchâtel, 241p., 111fig., 17tabl., 4ann.  
*Jury* : ZWAHLEN F., BURGER A., OESCHGER H., KUBLER B., BALDERER W.
12. **KOZEL Ronald (1992).** Erfassung organischer Spurenbelastungen, insbesondere durch Pflanzenbehandlungsmittel, in oberflächennahen Lockergesteins-Grundwässern. Thèse, Université de Neuchâtel, 400p.  
*Jury* : ZWAHLEN F., BURGER A., KUBLER B., WEIL L., HARTMANN D., AMMON H.-U.
13. **TACHER Laurent (1992).** SPHINX : un logiciel de simulation en hydrogéologie appliquée. Un exemple de configuration orientée vers la prospection d'eau en milieu à porosité d'interstice. Thèse, Université de Neuchâtel, 166p., 8 ann.  
*Jury* : ZWAHLEN F., KIRALY L., BESSON O., EMSELLEM Y., HURLIMANN W.
14. **DODO Abdelkader (1992).** Etude des circulations profondes dans le grand bassin sédimentaire du Niger : Identification des aquifères et compréhension de leurs fonctionnements. Thèse, Université de Neuchâtel, 101p., 44fig., 14tabl., 15ann., (03/09/1992).  
*Jury* : ZWAHLEN F., KIRALY L., BOUZELBOUDJEN M., BURGER A., MARGAT J., FONTES J.-Ch., STRUCKMEIER W.

## Résumé

---

**Dodo A., 1992. Etude des Circulations Profondes dans le Grand Bassin Sédimentaire du Niger : Identification des Aquifères et Compréhension de leurs Fonctionnements. 101p., 44 fig., 14 tabl., 15 ann.**

Le grand bassin sédimentaire du Niger appartient aux régions arides et semi-arides de l'Afrique occidentale. Les précipitations moyennes annuelles varient de 100 à 300mm au nord et de 300 à plus de 1000mm au sud. Les précipitations moyennes mensuelles qui traduisent l'évolution spatio-temporelle de l'Equateur météorologique, varient de 50 à 80mm au nord et de 150 à 250mm vers le sud. La période pluvieuse s'étend en général, de mai à septembre avec des maximas en août. Les événements pluvieux qui contribuent à la recharge effective des nappes sont de l'ordre de 5 à 20mm par jour respectivement au nord et au sud du bassin. L'infiltration efficace est estimée à environ 1mm par an sur tout le bassin ; elle peut atteindre 2mm par an plus au sud.

L'irrégularité des précipitations influence le régime des cours d'eau temporaires actifs seulement pendant la période pluvieuse, en particulier en août ; leurs débits moyens pendant les épisodes pluvieux sont de l'ordre de quelques m<sup>3</sup>/s à quelques dizaines de m<sup>3</sup>/s. Le fleuve Niger est le seul cours d'eau qui coule durant toute l'année. Ses crues ont lieu en général d'octobre à janvier et les étiages de mai à juin. Exceptionnellement, en mai 1985, suite à une sécheresse prolongée, le fleuve s'est complètement asséché à Niamey.

L'analyse des trois réservoirs gréseux triasico-jurassiques du Groupe des grès d'Agadès dans le bassin de l'Irhazer en vue de leur gestion conduit à l'élaboration d'une méthodologie d'étude des aquifères du grand bassin sédimentaire du Niger. Cette démarche s'est avérée nécessaire en raison de la méconnaissance du fonctionnement de ces aquifères.

L'approche systémique de cette étude s'appuie d'abord sur une critique constructive des données factuelles analytiques issues de 1058 forages profonds dans le bassin de l'Irhazer dont 567 dans le Groupe des grès d'Agadès. La profondeur des ouvrages varie respectivement de 20 à 1061m de la périphérie au centre du bassin. L'adéquation de ces données, présentées sous la forme d'informations élaborées simples (paramètres liés à la géométrie, à l'hydraulique et à l'hydrochimie des aquifères et aquitards) et complexes (isohypses des mur et toit des formations, isopièzes et isocones de la salinité de chaque aquifère), aboutit à l'identification et à la cartographie des aquifères de ce bassin.

La définition "raisonnable" de leurs conditions aux limites hydrogéologiques s'oriente vers l'étude des aquifères paléozoïques du bassin de Tin Séririne au nord et ceux crétacé du Continental intercalaire CI au sens strict et tertiaires du Continental Terminal CT du bassin d'Iullemeden au sud sur la base de 272 forages répartis de la manière suivante : 56 dans le Tin Séririne, 216 dans l'Iullemeden ; la profondeur de ces ouvrages varie respectivement de 20 à 1132m et de 40 à 3810m. Le grand bassin sédimentaire du Niger est ainsi approché dans son intégralité à l'aide de 1330 forages. Il se compose des sous-bassins de Tin Séririne, l'rhazer et lullemeden et regroupe 13 horizons aquifères échelonnés du Cambrien au Quaternaire.

Nous observons dans le bassin du Niger, d'une part plusieurs systèmes de failles décrochantes : les flexures-failles senestres NS et N30 héritées du socle, les failles dextres N70 à N80 dont la plupart sont jalonnées de sources, et d'autre part, des discontinuités transcratoniques de plusieurs centaines de kilomètres affectant la plaque africaine : la suture panafricaine d'un rejet de 1000m, le linéament guino-nubien dont le rejet peut atteindre et dépasser 300m, la dorsale d'In Guezzam et le rift de Tafadek.

L'écoulement général, nord-sud à nord-est - sud-ouest dans les aquifères du Tin Séririne et est-ouest à nord-est - sud-ouest dans ceux de l'rhazer, est convergent vers les réservoirs d'Iullemeden. Dans ce dernier, l'écoulement est divergent vers le fleuve Niger à l'ouest et vers le lac Tchad à l'est. Le gradient hydraulique moyen dans chacun des aquifères est de l'ordre de  $1 \times 10^{-4}$ .

L'analyse de certaines données hydrochimiques en particulier la salinité ainsi que l'apport de la géochimie isotopique ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^4\text{He}$ ) ont été utilisées pour corroborer les hypothèses formulées sur la dynamique et les conditions aux limites hydrogéologiques des aquifères. Les eaux sont en général peu minéralisées (salinité  $< 1\text{g/l}$ ) excepté dans certains réservoirs paléozoïques : 24g/l dans le Viséen inférieur, 28g/l dans le Namurien supérieur, 13g/l dans le Permien. La température des eaux les plus profondes atteint des valeurs de  $63^\circ\text{C}$ .

Les nappes du bassin du Niger sont en communication entre elles au travers des formations argileuses semi-perméables. Le débit entrant dans chacun de ses réservoirs en majorité captifs artésiens ne se maintient pas invariable d'amont en aval ; une partie est reprise par drainance dont le flux varie en moyenne de  $1 \times 10^{-2}$  à  $1 \times 10^{-3}$  l/s/km<sup>2</sup>.

Les circulations profondes des eaux souterraines, à travers ces formations perméables (grès) et semi-perméables (argiles, analcimolites, calcaires marneux) sont présentées par le biais de modèles conceptuels d'écoulement souterrains. Le grand bassin sédimentaire du Niger se présente comme un système aquifère multicouche.

## Mots-clés

Aquifère multicouche, Bassin Sédimentaire, Zone Aride, Drainance, Fracturation, Cartographie hydrogéologique, Modèles conceptuels d'écoulement, Salinité.

## Remerciements

*Au terme de mon travail, il m'est agréable de remercier les personnes et les organismes qui ont contribué à la réalisation de cette étude.*

*J'adresse mes sincères remerciements aux responsables du Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement à Niamey et particulièrement ceux d'Agadès pour les précieuses facilités qu'ils m'ont accordé durant mes recherches sur le terrain.*

*Mes remerciements vont également aux responsables de la Commission Fédérale des Bourses pour les étrangers et ceux de l'Institut Universitaire d'Etudes du Développement IUED pour leur appui financier et matériel en Suisse et au Niger (1988-1992) à travers le Programme Hydraulique Niger-Suisse PHNS.*

*J'exprime ma profonde reconnaissance à l'endroit du Professeur André Burger qui m'a reçu en 1984 au Centre d'Hydrogéologie et avec qui j'ai débuté ma thèse, et pour l'attention particulière qu'il porte à mes recherches.*

*J'adresse mes sincères remerciements au Professeur François Zwhalen qui m'a appuyé sans relâche tant en Suisse qu'au Niger pour la bonne réussite de mon travail.*

*J'exprime ma profonde gratitude au Professeur László Király pour ses précieux conseils scientifiques et ses encouragements durant tout mon travail.*

*Monsieur le Dr. Mahmoud Bouzelboudjen est à la fois un guide et un très cher ami. Vouloir le remercier serait dérisoire tant je lui dois pour avoir accepté de diriger scientifiquement ce mémoire, pour m'avoir éclairé sur l'hydrogéologie des régions arides et semi-arides, guidé sur l'élaboration des méthodologies sur l'étude hydrodynamique des grands bassins sédimentaires et la simulation numérique des écoulements souterrains.*

*C'est un honneur pour moi de compter parmi les membres du jury :*

*- Monsieur le Professeur Jean Margat, conseiller scientifique du BRGM et à Monsieur le Dr. Wilhelm Struckmeier du BGR, pour les discussions enrichissantes à l'origine de certaines idées développées dans la cartographie hydrogéologique et pour leurs critiques constructives de mon travail lors de mon passage notamment chez M. Margat au BRGM à Orléans.*

*- Monsieur le Professeur Jean-Charles Fontes qui m'a accueilli chaleureusement dans son laboratoire d'Hydrologie isotopique de Paris-Sud, pour ses remarques constructives et enrichissantes en rapport avec ses recherches géochimiques et isotopiques dans le même bassin sédimentaire du Niger, dans le cadre du programme PALIDAF (Paléo-hydrologie en Afrique).*

*A Monsieur Safar-Zitoun Mohamed, qu'il soit rassuré de ma profonde reconnaissance pour m'avoir invité à présenter la carte hydrogéologique du bassin de l'Irhazer à Nairobi au Kenya du 13 au 17 mars 1991 lors de la Quatrième Réunion d'Experts du PCHIA. Je remercie la famille Safar-Zitoun pour son amitié.*

*A mon très cher ami Abdallah Mdaghri Alaoui, je lui adresse ma profonde reconnaissance pour sa disponibilité constante. Je n'oublierai jamais son inestimable contribution.*

*J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Habib Zébid, Directeur de la Division des Sciences de l'Eau à l'UNESCO, pour ses critiques constructives qu'il a apporté à mon travail de cartographie.*

*J'adresse tout particulièrement ma reconnaissance aux responsables du Ministère des Mines et de l'Energie, ceux des sociétés minières nationales et internationales, COMINAK, SOMAÏR, PNC et IRSA au Niger et enfin ceux de la COGEMA à Paris grâce à qui j'ai pu obtenir d'importantes données géologiques et hydrogéologiques.*

*Je n'oublierai pas mon passage à l'Institut de Géologie et de Minéralogie de l'Université de Genève (1979-1984). Je garde un très bon souvenir de mes contacts avec MM. les Professeurs Marc Vuagnat, Felice Jaffé, Ronald Chessex et Eric Davaud, Dr. Jean Bertrand maître d'enseignement et de recherches, mes chers collègues Mmes Katarina Ferrari, Elione Despland, MM. Hervé Détraz et Thierry Blondel.*

*Cette recherche n'aurait pu se réaliser sans l'aide et l'amitié de nombreuses personnes . C'est pour moi un devoir agréable de remercier :*

*- Dr. Mahmoud Bouzelboudjen, pour sa disponibilité, ses conseils fraternels et les moments agréables et inoubliables passés ensemble en famille avec son épouse Anna et leur adorable Célia.*

*- Abdallah Mdaghri Alaoui, pour son amitié sans faille et les moments agréables partagés très souvent ensemble,*

*- Mmes Burger et Zwahlen qui m'ont à maintes reprises invité très chaleureusement dans leur foyer familial,*

*- Monsieur le Dr. Inoussa Ousséini Sountalma, Sociologue, Cinéaste et ex-Président des cinéastes africains et de CIPRO-FILM (Consortium pour la Production des films africains), pour ses conseils fraternels et ses encouragements. J'exprime mes vifs remerciements à la famille Sountalma à Niamey, à Zinder et à Gouré.*

*J'exprime tout particulièrement ma plus vive reconnaissance à mes parents, à ma sœur Hadiza et à mon frère Hassane qui m'ont sans cesse témoigné leurs encouragements constants, leur amour, patience et compréhension.*

*A tous ceux et à toutes celles qui se sont donné(e)s la peine à contribuer à la finalisation de mon travail, je leur adresse mes sincères remerciements.*

# Sommaire

*Imprimatur*

*Liste des thèses soutenues au Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel*

*Résumé*

*Remerciements*

*Sommaire*

*Liste des illustrations*

*Liste des abréviations*

## **Chapitre 1 : Définition du Sujet**

1.1. But initial.....	1
1.2. Changement du but et définition d'une nouvelle démarche.....	1
1.3. Démarche de l'étude.....	3

## **Chapitre 2 : Grands Bassins Sédimentaires en Zones Arides**

2.1. Essai de définition .....	8
2.2. Le grand bassin du Sahara Septentrional.....	9
2.2.1. Le Continental intercalaire CI.....	11
2.2.2. Le Continental Terminal CT.....	11
2.3. Le Grand Bassin Artésien Australien .....	12
2.4. Conclusion .....	12
2.5. Le bassin du Niger.....	14
2.5.1. Grands traits géomorphologiques.....	14
2.5.2. Contexte géologique et hydrogéologique régional .....	14
2.5.3. Structure et géométrie du bassin.....	16
2.5.4. Contexte hydroclimatologique .....	18

## **Chapitre 3 : Identification et Géométrie des Aquifères du Bassin du Niger**

3.1. Collecte des données .....	28
3.2. Banque de données .....	30
3.2.1. Banque de données statiques.....	31
3.2.2. Banque de données dynamiques.....	31
3.3. Structure et géométrie du bassin .....	32
3.3.1. Analyse structurale dans le Tin Séririne-Irhazer .....	32
3.3.2. Sous-bassin de Tin Séririne.....	36
3.3.3. Sous-bassin de l'Irhazer .....	37
3.3.4. Sous-bassin d'Iullemeden .....	42
3.5. Conclusion .....	44

**Chapitre 4 :** Etude Hydrodynamique des Aquifères Profonds et Superficiels du Bassin du Niger

4.1. Aquifère du Cambro-Ordovicien.....	47
4.1.1. Piézométrie.....	47
4.1.2. Paramètres hydrodynamiques .....	47
4.1.3. Hydrochimie .....	48
4.2. Aquifère du Dévonien inférieur.....	48
4.2.1. Piézométrie.....	48
4.2.2. Paramètres hydrodynamiques .....	49
4.2.3. Hydrochimie .....	49
4.3. Aquifère du Viséen inférieur (Farrazékat).....	50
4.3.1. Piézométrie.....	50
4.3.2. Paramètres hydrodynamiques .....	50
4.3.3. Hydrochimie .....	50
4.4. Aquitard du Namurien inférieur (Guezouman).....	50
4.4.1. Piézométrie.....	50
4.4.2. Paramètres hydrodynamiques .....	50
4.4.3. Hydrochimie .....	50
4.5. Aquifère du Namurien supérieur (= Tarat) .....	51
4.5.1. Piézométrie.....	51
4.5.2. Paramètres hydrodynamiques .....	51
4.5.3. Hydrochimie .....	51
4.6. Aquitard du Permien (Izégouande).....	51
4.6.1. Piézométrie.....	51
4.6.2. Paramètres hydrodynamiques .....	52
4.6.3. Hydrochimie .....	52
4.7. Aquifères du Trias - Jurassique (Groupe d'Agadès).....	52
4.7.1. Aquifères du Trias - Jurassique inférieur.....	52
4.7.2. Aquifère du Jurassique supérieur.....	54
4.7.3. Aquifère du Groupe des grès d'Agadès.....	55
4.9. Aquifère du Crétacé (Le Continental intercalaire C1 au sens strict).....	58
4.8.1. Piézométrie.....	58
4.8.2. Paramètres hydrodynamiques .....	59
4.8.3. Hydrochimie .....	59
4.9. Continental terminal 1 CT1 .....	61
4.9.1. Piézométrie.....	61
4.9.2. Paramètres hydrodynamiques .....	61
4.9.3. Hydrochimie .....	61
4.10. Aquifère du CT2.....	61
4.10.1. Piézométrie.....	61
4.10.2. Paramètres hydrodynamiques.....	61
4.10.3. Hydrochimie.....	61

## Sommaire

4.11. Aquifère du CT3.....	62
4.11.1. Piézométrie.....	62
4.11.2. Paramètres hydrodynamiques.....	62
4.11.3. Hydrochimie.....	62
4.12. Aquifères superficiels.....	62
4.13. Relations hydrodynamiques entre les aquifères superposés paléozoïques et mésozoïques ...	63
4.13.1. Nappes du Cambro-Ordovicien et du Dévonien inférieur.....	63
4.13.2. Nappes du Dévonien inférieur et du Viséen inférieur.....	64
4.13.3. Nappes du Viséen inférieur et du Namurien supérieur.....	64
4.13.4. Nappes du Namurien supérieur et du Trias-Jurassique inférieur.....	64
4.13.5. Nappes du Trias-Jurassique inférieur et Jurassique supérieur.....	64
4.13.6. Nappes du Continental intercalaire CI et CT1.....	65
4.13.7. Nappes du CT1 et du CT2.....	65
4.13.8. Nappes du CT2 et du CT3.....	65
4.13.9. Conclusion.....	65
4.14. Essai de définition des conditions aux limites hydrogéologiques du bassin du Niger.....	65
4.14.1. Le Cambro-Ordovicien.....	65
4.14.2. Le Dévonien inférieur.....	66
4.14.3. Le Viséen inférieur.....	67
4.14.4. Le Namurien supérieur.....	67
4.14.5. Aquifère du Trias-Jurassique inférieur.....	67
4.14.6. Le Jurassique supérieur.....	67
4.14.7. L'aquifère du Continental intercalaire CI.....	67
4.14.8. Les aquifères du Continental Terminal CT.....	67
4.14.9. Aquifères quaternaires.....	67
4.15. Carte hydrogéologique du bassin de l'Irhazer au 1:500'000 (Aquifères des grès d'Agadès)...	68
4.15.1. Aquifères continus.....	68
4.15.2. Aquifères discontinus.....	72
4.15.3. Formations semi-perméables.....	72
4.15.4. Formations non-aquifères.....	72
4.15.5. Lithologie.....	72
4.15.6. Points d'eau.....	72
4.15.7. Piézométrie.....	72
4.15.8. Hydrochimie.....	72
4.15.9. Modèles conceptuels d'écoulement souterrain.....	74
4.16. Conclusion.....	74

## Chapitre 5 : Modèles Conceptuels d'Écoulement Souterrain dans le Bassin du Niger

5.1. Modèles conceptuels d'écoulement souterrain.....	75
5.2. Circulations profondes dans le bassin du Niger Septentrional.....	77
5.2.1. Bassins de Tin Séririne et de l'Irhazer.....	77
5.2.2. Bassins de Tin Séririne et d'Iullemeden.....	77

5.3. Circulations profondes dans le bassin du Niger Central .....	77
5.3.1. Bassins de l'Irhazer et d'Iullemeden Est-Ouest .....	77
5.3.2. Bassins de l'Irhazer et d'Iullemeden Nord-Sud.....	79
5.4. Circulations profondes dans le bassin du Niger Occidental .....	82
5.5. Conclusion .....	82

## **Chapitre 6 : Conclusion Générale et Recommandations**

6.1. Conclusion Générale.....	83
6.2. Recommandations .....	85

Bibliographie.....	91
--------------------	----

Liste des travaux de diplôme de 3ème cycle réalisés au Niger.....	101
---	-----

Extrait du Curriculum Vitae

Annexes

## Liste des illustrations

### Liste des figures

- Figure 1 : Essai de définition des conditions aux limites hydrogéologiques des aquifères du Groupe des grès d'Agadès.
- Figure 2 : Organigramme résumant les principales étapes adoptées dans l'étude des aquifères du grand bassin du Niger.
- Figure 3 : Bassin sédimentaire du Sahara septentrional : systèmes aquifères du Continental intercalaire CI et du Complexe terminal CT (Anon/Unesco, 1972).
- Figure 4 : Le grand bassin artésien australien (extrait de M.A. Habermehl, 1980).
- Figure 5 : Cadre géographique et géologique du grand bassin sédimentaire du Niger.
- Figure 6 : Structure du bassin du Niger (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM - No1 - 1992).
- Figure 7 : Variations extrêmes du Front Intertropical FIT (Sircoulon, 1976).
- Figure 8 : Variation pluriannuelle Pa de la pluie dans le bassin du Niger.
- Figure 9 : Moyennes mensuelles des précipitations Pm et de l'évapotranspiration ETp (selon Penman) dans le bassin du Niger.
- Figure 10 : Apports moyens par jour de la pluie. Période 1950-1967 (A) et 1968-1985 (B) (Morel, 1992).
- Figure 11 : Réseau hydrographique du fleuve Niger.
- Figure 12 : Réseau hydrographique dans le bassin du Niger.
- Figure 13 : Evolution des climats sahariens (Muzzolini, 1982).
- Figure 14 : Périmètres miniers dans les sous-bassins du Tin Séririne et d'Irhazer.
- Figure 15 : Structure du sous-bassin de Tin Séririne-Irhazer (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM, No1-2, 1992).
- Figure 16 : A. - Coupe transversale dans la partie méridionale de l'Irhazer. B. - Coupe longitudinale dans le domaine Ouest-flexure de l'Irhazer.
- Figure 17 : Coupes transversales dans la partie centrale de l'Irhazer (A) et de Tin Séririne (B).
- Figure 18 : Coupe longitudinale dans le domaine Est-flexure de l'Irhazer.
- Figure 19 : Isohypses du mur (A) et du toit (B) du Cambro-Ordovicien.
- Figure 20 : Isohypses du mur (A) et du toit (B) du Dévonien inférieur.
- Figure 21 : Isohypses du mur du Trias (Téloua I II III).
- Figure 22 : Isohypses du mur du Mousseden.
- Figure 23 : Carte piézométrique (A) et de salinité (B) de l'aquifère du Cambro-Ordovicien.
- Figure 24 : Aquifère du Dévonien inférieur :
- A. - Carte piézométrique et champ des paramètres chimiques (salinité).
  - B. - Evolution du potentiel hydraulique et de la salinité.
- Figure 25 : Carte piézométrique (A) et isocones de salinité (B) du Trias + Jurassique inférieur.
- Figure 26 : Carte piézométrique (A) et isocones de salinité de l'aquifère du Jurassique supérieur.
- Figure 27 : Carte piézométrique de l'aquifère du Trias + Jurassique (Groupe des grès d'Agadès).
- Figure 28 : Evolution du potentiel hydraulique, de la salinité et de l'Hélium d'est en ouest.
- Figure 29 : Carte piézométrique de l'aquifère du Continental intercalaire CI au sens strict.
- Figure 30 : Carte de salinité du Continental intercalaire CI.
- Figure 31 : Evolution du potentiel hydraulique; de la salinité et du  $^{14}\text{C}$  du nord-est au sud-ouest dans le Continental intercalaire CI.
- Figure 32 : Différences de potentiel entre les aquifères paléozoïques et mésozoïques du Tin Séririne et Irhazer.
- Figure 33 : Classification des formations géologiques selon leur nature et leurs comportements hydrogéologiques (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM, No1-2, 1992).
- Figure 34 : Aquifères du bassin du Niger (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM, No1-2, 1992).
- Figure 35 : Extrait de la légende de la carte hydrogéologique des aquifères du sous-bassin du l'Irhazer (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM, No1-2, 1992).
- Figure 35 (suite) : Extrait de la légende de la carte hydrogéologique des aquifères du sous-bassin du l'Irhazer (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM, No1-2, 1992).
- Figure 36 : Classement des points d'eau par aquifère(s) capté(s) (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM, No1-2, 1992).
- Figure 37 : Circulations profondes des eaux souterraines dans le bassin du Niger : tracé des coupes des schémas d'écoulement établis pour l'essai de définition des relations hydrodynamiques entre les sous-bassins.
- Figure 38 : Modèles conceptuels d'écoulement souterrain en coupe NS (A) et NE-SW (B) :
- A - relations hydrodynamiques entre les sous-bassins de Tin Séririne et d'Irhazer.
  - B - relations hydrodynamiques entre les sous-bassins de Tin Séririne et d'Iullemeden.
- Figure 39 : Modèles conceptuels d'écoulement en coupe EW : relations hydrodynamiques entre les sous-bassins d'Irhazer et d'Iullemeden.
- Figure 40 : Modèles conceptuels d'écoulement souterrain en coupe nord-sud (A) et nord-sud - nord-est-sud-ouest (B) : relations entre les sous-bassins d'Irhazer et d'Iullemeden.

- Figure 41 : Alimentation (drainance, infiltration), émergences naturelles (sources) et directions d'écoulement souterrain dans l'Irhazer : conditions aux limites du Groupe des grès d'Agadès.
- Figure 42 : Schéma d'écoulement en coupe nord-est - sud-ouest : relations hydrodynamiques entre les aquifères du Continental intercalaire CI et ceux du Continental terminal CT (Ousséini et al., 1992).
- Figure 43 : Illustration élaborée à partir des travaux de Margat et al. (1982) montrant les principales étapes conduisant à la gestion d'un réservoir.
- Figure 44 : Organigramme du modèle de gestion des ressources en eau de l'aquifère multicouche du bassin du Niger

## Liste des tableaux

- Tableau 1 : Ressources et réserves des grands bassins sédimentaires (Extrait de Forkasiewicz & Margat, 1982).
- Tableau 2 : Evaluation des degrés d'aridité dans le bassin du Niger.
- Tableau 3 : Débits moyens mensuels du fleuve Niger à la station de jaugeage de Niamey.
- Tableau 4 : Analyse statistique des forages dans les trois principaux aquifères du bassin du Niger.
- Tableau 5 : Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère du Cambro-Ordovicien.
- Tableau 6 : Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère du Dévonien inférieur.
- Tableau 7 : Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère du Namurien supérieur.
- Tableau 8 : Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquitard du Permien à Arlit.
- Tableau 9 : Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquitard du Permien à Teguidda N'Tessoum.
- Tableau 10 : Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère du Trias-Jurassique inférieur.
- Tableau 11 : Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère du Jurassique supérieur.
- Tableau 12 : Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère du Groupe des grès d'Agadès.
- Tableau 13 : Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère du Continental intercalaire.
- Tableau 14 : Caractéristiques physiques et hydrodynamiques de l'aquifère du Quaternaire.

## Liste des annexes

### Annexe 1 : Réseau hydrographique des oueds dans le Tin Séririne-Irhazer.

A.1 : Réseau hydrographique dans les sous-bassins de Tin Séririne et d'Irhazer.

### Annexe 2 : Collecte et élaboration de la banque de données hydrogéologiques.

A.2.1 : Exemple de dossier de forages.

A.2.2 : Collecte des données et extrait de la banque des données sur dBase III<sup>+</sup>

A.2.3 : Calcul de la hauteur piézométrique d'un niveau aquifère (Technip, 1970).

### Annexe 3 : Géométrie du bassin du Niger.

A.3.1 : Situation des coupes sériées dans le bassin du Niger.

A.3.2 : Coupe EW dans le sous-bassin de Tin Séririne - Irhazer : situation du Groupe des grès d'Agadès.

A.3.3 : (A) - Coupe EW dans le sous-bassin de Tin Séririne-Irhazer : individualisation de "bassins" structuraux. (B) - Coupes NS dans le sous-bassin de Tin Séririne-Irhazer : zone d'exutoire des grès d'Agadès (cf. figures 34 et 35)

### Annexe 4 : Isohypses de l'aquifère du Viséen inférieur.

A.4.1 : Limites d'extension des réservoirs aquifères dans le bassin du Niger.

A.4.2 : Isohypses du mur et du toit de l'aquifère du Viséen inférieur (Farazékat).

### Annexe 5 : Cartes d'isohypses de l'aquifère du Namurien supérieur.

A.5 : Isohypses du mur et du toit du Namurien supérieur (Tarat).

### Annexe 6 : Cartes d'isohypses des formations du Groupe des grès d'Agadès.

A.6.1 : Isohypses du toit de l'aquifère du Trias (Téloua I II III).

A.6.2 : Isohypses du mur de l'aquifère du Jurassique inférieur (Tchirozérine I).

A.6.3 : Isohypses du mur d'Abinky.

A.6.4 : Isohypses du mur de l'aquifère du Jurassique supérieur (Tchirozérine II).

A.6.5 : Isohypses du toit de l'aquifère du Jurassique supérieur (Tchirozérine II).

#### **Annexe 7 : Cartes d'isohypses de l'aquifère du Continental Terminal 1 (CT1)**

- A. 7.1 : Isohypses du mur de l'aquifère du Continental Terminal I CT1 [d'après Bonnier, 1990].
- A. 7.2 : Isohypses du toit de l'aquifère du Continental Terminal I CT1 [d'après Bonnier, 1990].

#### **Annexe 8 : Cartes d'isohypses de l'aquifère du Continental Terminal 2 (CT2)**

- A. 8.1 : Isohypses du mur de l'aquifère du Continental Terminal II CT2 [d'après Bonnier, 1990].
- A. 8.2 : Isohypses du toit de l'aquifère du Continental Terminal II CT2 [d'après Bonnier, 1990].

#### **Annexe 9 : Cartes d'isohypses de l'aquifère du Continental Terminal 3 (CT3)**

- A. 9 : Isohypses du mur de l'aquifère du Continental Terminal III CT3 [d'après Bonnier, 1990].

#### **Annexe 10 : Aquifère du Viséen Inférieur : Piézométrie et Chimie.**

- A.10 : Carte piézométrique de l'aquifère du Viséen inférieur et évolution du potentiel hydraulique et de la salinité du Viséen inférieur.

#### **Annexe 11 : Piézométrie de l'aquitard du Namurien Inférieur.**

- A.11.1 : Piézométrie de l'aquitard du Namurien inférieur (Guézouman) dans le périmètre minier d'Arlit [Année : 1969].
- A.11.2 : Piézométrie de l'aquitard du Namurien inférieur (Guézouman) dans le périmètre minier d'Arlit [Année : 1988].

#### **Annexe 12 : Piézométrie chimie de l'aquifère du Namurien supérieur.**

- A.12.1 : Carte piézométrique et carte de la salinité de l'aquifère du Namurien supérieur.
- A.12.2 : Evolution du potentiel hydraulique et de la salinité (en coupe) du Namurien supérieur.
- A.12.3 : Piézométrie du Namurien supérieur dans le périmètre minier d'Arlit [Année : 1969].
- A.12.4 : Piézométrie du Namurien supérieur dans le périmètre minier d'Arlit [Année : 1988].

#### **Annexe 13 : Piézométrie de l'aquitard du Permien.**

- A.13.1 : Piézométrie de l'aquitard du Permien (Izégouande) dans le périmètre minier d'Arlit [Année : 1969].
- A.13.2 : Piézométrie de l'aquitard du Permien (Izégouande) dans le périmètre minier d'Arlit [Année : 1988].

#### **Annexe 14 : Champ des transmissivités de l'aquifère du Continental Intercalaire CI.**

- A.14. : Champ des transmissivités T de l'aquifère du Continental intercalaire CI (ss).

#### **Annexe 15 : Aquifères du Continental Terminal CT (CT1, CT2, CT3) : Piézométrie et Chimie.**

- A.15.1 : Carte piézométrique de l'aquifère du Continental Terminal I CT1 [d'après Bonnier, 1990].
- A.15.2 : Carte d'iso-salinité [g/l] de l'aquifère du Continental Terminal I CT1 [d'après Bonnier, 1990].
- A.15.3 : Carte piézométrique de l'aquifère du Continental Terminal II CT2 [d'après Bonnier, 1990].
- A.15.4 : Carte d'iso-salinité [g/l] de l'aquifère du Continental Terminal II CT2 [d'après Bonnier, 1990].
- A.15.5 : Carte piézométrique de l'aquifère du Continental Terminal III CT3 [d'après Bonnier, 1990].
- A.15.6 : Carte d'iso-salinité [g/l] de l'aquifère du Continental Terminal III CT3 [d'après Bonnier, 1990].

## Liste des abréviations

<b>AGRHYMET</b>	Agronomie, Hydrologie, Météorologie (Niamey, Niger).
<b>AIEA</b>	Agence Internationale pour l'Energie Atomique (Vienne, Autriche).
<b>ANRH</b>	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (Alger, Algérie).
<b>BRGM</b>	Bureau des Recherches Géologiques et Minières (Orléans, France).
<b>CEA</b>	Commissariat à l'Energie Atomique (Paris, France).
<b>CGG</b>	Compagnie Générale de Géophysique (Paris, France).
<b>CHYN</b>	Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (Neuchâtel, Suisse).
<b>CIEM</b>	Comité Inter-Etat d'Etudes Hydrauliques (Ouagadougou, Burkina Faso).
<b>CILSS</b>	Comité Inter-Etat de Lutte contre la Sécheresse et le Sahel (Ouagadougou, Burkina Faso).
<b>COGEMA</b>	Compagnie Générale des Matières Nucléaires (Paris, France).
<b>COMINAK</b>	Compagnie Minière d'Akouta (Arlit, Niger).
<b>DNM</b>	Direction Nationale de la Météorologie (Niamey, Niger).
<b>EREM</b>	Entreprise des Ressources Minières (Alger, Algérie).
<b>FAO</b>	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (Rome, Italie).
<b>GAM</b>	Groupe Afrique-Madagascar - Groupement d'Actions de Recherches Minières à l'étranger (Paris, France).
<b>IGN</b>	Institut Géographique National (Saint-Mendé, France).
<b>IRSA</b>	International Resources S.A. (Tokyo, Japon).
<b>JPTC</b>	Japon Power Nuclear Corporation (Tokyo, Japon).
<b>OACT</b>	Organisation Africaine de Cartographie et de Télédétection (Alger, Algérie).
<b>ONAREM</b>	Officie National des Ressources Minières du Niger (Niamey, Niger).
<b>ORSTOM</b>	Office des Recherches Scientifiques pour le Développement en Coopération. Ancien Office des Recherches Scientifiques des Territoires d'Outre-Mer (Paris, France).
<b>PCHIA</b>	Programme de Cartographie Hydrogéologique Internationale de l'Afrique (Alger, Algérie).
<b>PNUD</b>	Programme des Nations Unies pour le Développement (New York, Etats-Unis).
<b>SIGNER</b>	Système d'Information Géographique du Niger : Projet PNUD/NER/86/001 (Niamey, Niger).
<b>SOMAIR</b>	Société des Mines de l'Air (Arlit, Niger).
<b>SONICHAR</b>	Société Nigérienne d'Exploitation du Charbon d'Anou Araren (Tchirozérine, Niger).
<b>UNESCO</b>	Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture (Paris, France).

# *Chapitre 1*

*Définition du Sujet*

# Chapitre 1

---

## Définition du Sujet

1.1. But initial.....	1
1.2. Changement du but et définition d'une nouvelle démarche.....	2
1.3. Démarche de l'étude.....	4

### 1.1. But initial

Le bassin de l'Irhazer, situé dans les régions arides du Niger, bénéficie d'une attention particulière grâce à ses richesses minières. Plusieurs campagnes d'exploration des aquifères ont été menées dans le bassin de l'Irhazer. Le premier but de ces recherches était d'alimenter en eau potable les principales bases minières. Le second était d'évaluer les ressources potentielles des différents réservoirs aquifères.

Le développement des périmètres miniers exploités par différentes sociétés nationales et internationales a entraîné la multiplication de forages profonds depuis 1962.

Dès 1985, le ministère de l'hydraulique et de l'environnement encouragea les études de synthèse afin d'édifier une planification pour une meilleure gestion des ressources en eau.

Les formations du "Groupe des grès d'Agadès" ont fait l'objet d'une investigation importante marquée par l'implantation de nombreux forages. Aussi, il nous a été proposé de concevoir une modélisation de ces réservoirs à la lumière de nombreux travaux et rapports existants sur la région.

## 1.2. Changement du but et définition d'une nouvelle démarche

Dès 1960, sur la base des données hydrogéologiques disponibles (150 points d'eau), Joulia définissait la nappe du Groupe des grès d'Agadès (au sens large) composée des formations triasico-jurassiques. En réalité, la "nappe" des grès d'Agadès représente une superposition complexe de plusieurs aquifères.

Greigert en 1978 et plus tard Margat en 1982, considéraient que l'ensemble des formations des bassins de l'Irhazer et du Tin Séririne étaient séparés par une limite étanche du grand aquifère crétacé du Continental intercalaire CI. Celui-ci est ainsi déconnecté, en termes de continuité hydraulique, de ces bassins.

Avec l'apport de nouvelles données issues de 1330 forages, nous nous sommes aperçus que, si "l'aquifère" était "identifié", son extension, sa géométrie, les relations entre les différentes nappes qui le composent ainsi qu'avec les autres formations dans le bassin restaient à préciser. Aussi, avant d'évaluer les potentialités de ces aquifères et encore moins d'entreprendre une modélisation des écoulements souterrains, une réflexion et une "vue" régionale devaient être tentées. En effet, la délimitation des conditions aux limites raisonnables, la connaissance des champs des potentiels hydrauliques et des paramètres hydrodynamiques (K, S, ne), *préalable incontournable* [Bouzelboudjen, 1987], nous amène à appréhender des questions telles que (fig. 1) :

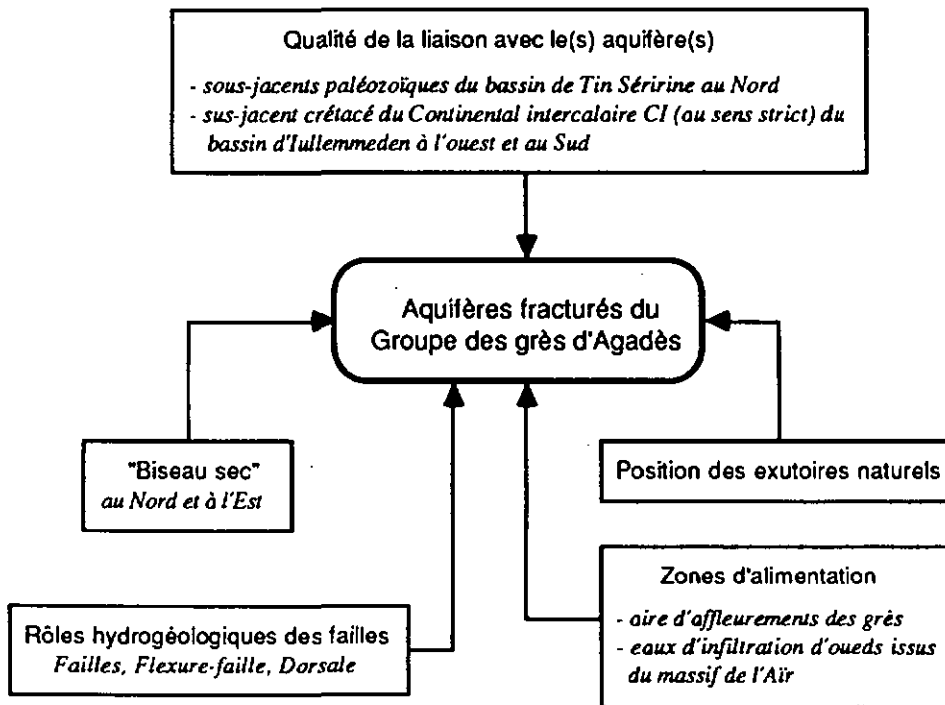


Figure 1 : Essai de définition des conditions aux limites hydrogéologiques des aquifères du Groupe des grès d'Agadès.

- Si le Groupe des grès d'Agadès repose sur les aquifères et aquitards paléozoïques bien développés dans le bassin de Tin Séririne, quel est alors leur degré d'interaction entre ces réservoirs sachant que le bassin de Tin Séririne est en continuité hydraulique avec celui de l'Irhazer [Dodo & Bouzelboudjen, 1990 ; 1992] ?

- Si le "biseau sec" est considéré comme limite à flux nul à un instant donné [Margat, 1991], quel est son tracé dans chaque aquifère ?
- Si les quelques sources liées à certaines failles sont les seuls exutoires naturels observables, de quels aquifères sourdent ces eaux souterraines ? D'un débit de quelques litres par seconde, représentent-elles les seuls exutoires naturels d'un si vaste réservoir ?
- Quels sont les rôles hydrogéologiques de ces failles [Dodo, 1986 ; 1989] ? Lesquelles seront effectivement prises en considération dans la simulation numérique [Király, 1979 ; 1987] ?
- Comment fonctionne la dorsale d'In Guezzam entre les aquifères du bassin de Tin Séririne-Irhazer à l'est et celui crétacé du Continental intercalaire CI au sens strict du bassin d'Iullemeden à l'ouest ?

Malheureusement ce n'est pas tout. Aucune étude n'a, à ce jour, clairement défini la limite d'extension méridionale des aquifères du Groupe des grès d'Agadès. Quel est le degré de liaison entre ces aquifères et les formations crétacées qui le surmontent, en particulier le vaste aquifère du Tégama (CI au sens strict) ?

A travers ces quelques interrogations, on admettra que les connaissances sont très fragmentaires, tant sur le nombre d'aquifères du Groupe des grès d'Agadès, leur géométrie, leurs champs des potentiels hydrauliques, des paramètres physiques et hydrodynamiques, leurs conditions aux limites hydrogéologiques, que sur leurs interactions mutuelles et avec les autres réservoirs.

Ainsi, notre intention première de focaliser l'étude sur le Groupe des grès d'Agadès pour promouvoir sa gestion, nous conduit *de facto* à une vue plus régionale de l'étude des aquifères profonds du grand bassin du Niger allant du Cambrien au Quaternaire. Le bassin du Niger se présente en un ensemble de sous-bassins : Tin Séririne, Irhazer, Iullemeden. Il intègre ainsi les principales zones de recharge et de décharge des aquifères à l'exception du graben de Gao par lequel il communique avec les aquifères du bassin de Taoudenni.

Il est reconnu que la hiérarchisation d'une nappe en **systèmes d'écoulement souterrain** [Tóth, 1962 ; 1963] ou en **unité hydrogéologique** [Király, 1978] juxtaposés ou superposés, représente le mieux son comportement dans ses conditions naturelles et sous l'effet perturbateur de l'intervention humaine. Ces systèmes offrent un cadre idéal pour la synthèse de tous les renseignements hydrogéologiques que l'on possède sur cette nappe. La première étape fondamentale serait donc de définir le système hydraulique comme entité hydrogéologique dotée d'une certaine structure et en rapport d'interaction hydrodynamique avec son environnement.

Il est donc compréhensible que l'identification et la caractérisation des aquifères ainsi que l'élaboration des **modèles conceptuels d'écoulement souterrain** synthétiques et cohérents avec les observations réelles, occuperont presque la totalité de notre travail ; sans cela, toute tentative de modélisation est vouée à l'échec. Cette démarche est *indispensable* pour assurer des conditions aux limites hydrogéologiques raisonnables à chaque aquifère et pour estimer, du moins qualitativement, le degré de liaison entre les aquifères des grès d'Agadès et leurs environnements, en d'autres termes, de comprendre leurs fonctionnements.

La démarche que nous adoptons découle par la collecte et l'organisation des données hydrogéologiques *disponibles* du système réel, traduites en termes de propriétés physiques et hydrodynamiques, de conditions aux limites hydrogéologiques et de qualité de l'eau en vue de l'édification de schémas

d'écoulement souterrain.

Finalement, notre travail peut être reconsidéré comme un essai d'identification des circulations profondes des eaux souterraines dans le grand bassin sédimentaire du Niger.

### 1.3. Démarche de l'étude

L'identification des circulations profondes des eaux dans le grand bassin du Niger nécessite l'élaboration d'une méthodologie d'étude. Nous avons résumé celle-ci par un organigramme (fig. 2) ; chaque étape devrait permettre d'éclaircir les précédentes et de préparer les suivantes.

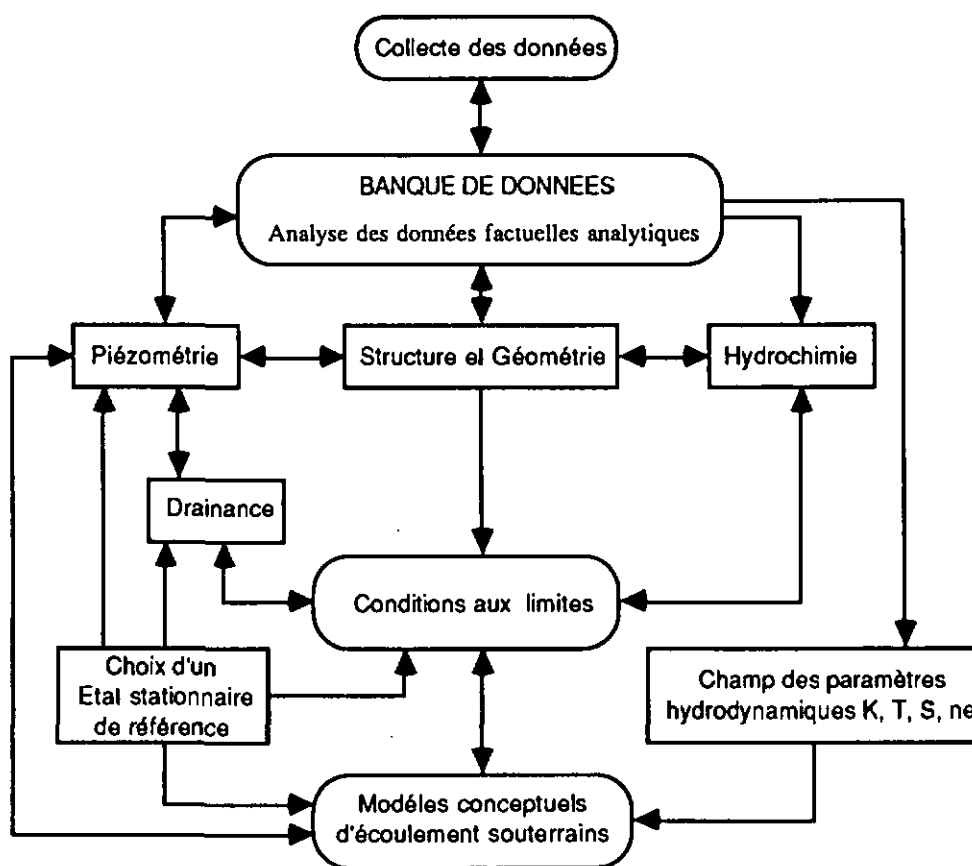


Figure 2 : Organigramme résumant les principales étapes adoptées dans l'étude des aquifères du grand bassin du Niger.

### Grands bassins sédimentaires en zones arides

Nous jugeons utile de débiter notre travail par le rappel des éléments hydrogéologiques essentiels qui caractérisent un grand bassin sédimentaire à la lumière des données récentes disponibles. Cet essai de synthèse n'a pas la prétention de réunir les études réalisées dans tous les bassins sédimentaires ; il se restreint particulièrement aux principaux cas historiques des régions arides et semi-arides illustrés par le bassin du Sahara septentrional (Algérie-Tunisie) et le grand bassin artésien d'Australie. Ces deux bassins servent de référence sur les premières études d'évaluation des ressources en eau d'un grand

bassin et comme un exemple de démonstration d'une analyse *a posteriori* d'exploitation intensive sous la pression des besoins, contrairement au bassin du Niger peu sollicité.

### **Identification et Géométrie des Aquifères**

Cette étape s'appuie sur l'analyse des données disponibles. La caractéristique fondamentale et indispensable de cette analyse réside dans la sélection et la classification de chaque point d'eau selon l'âge et le nombre d'aquifère(s) capté(s) de manière à respecter l'aspect tridimensionnel de la stratigraphie et de la superposition des couches géologiques. Les données factuelles analytiques de base (niveau piézométrique dans le forage) doivent être critiquées tant sur leur nature que sur leur précision, afin de les présenter sous la forme d'une information élaborée (carte piézométrique), adaptée à l'usage possible à l'un des stades de l'étude. La première approche a été de reconstituer la géométrie du bassin du Niger par l'établissement de coupes et des cartes structurales (isohypses du mur et du toit de chaque réservoir). Celles-ci ont été dressées d'abord dans le Tin Séririne, ensuite l'Irhazer et enfin l'Iullemeden, à partir de l'abondante information issue des forages miniers profonds accompagnés des données de diagraphies.

### **Etude hydrodynamique**

L'identification de chaque aquifère s'appuie sur l'aspect géologique (conditions de lithologie et de structure) et sur des considérations d'ordre hydrodynamique par l'analyse des données élaborées simples (isopièzes, isocones) et complexes (lignes d'égalité de différence de potentiel entre deux aquifères). Elle nécessite également, dans la mesure des données disponibles, la caractérisation de l'aquifère par le champ des paramètres hydrodynamiques (K, T, S, ne) qui régissent ses fonctions conductrices et capacitives. L'identification conduira à la délimitation du réservoir impliquant la définition hydrogéologique claire de ses limites en termes de conditions hydrodynamiques ("conditions aux limites") aisément représentables (aires d'alimentation, position des exutoires naturels par exemple).

L'analyse des données chimiques (salinité) et isotopiques ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^4\text{He}$ ) vise uniquement à corroborer les hypothèses formulées dans l'essai de définition et de compréhension du fonctionnement de chaque aquifère.

Notre travail d'identification se distingue, du moins dans son esprit, d'une étude hydrodynamique essentiellement descriptive des aquifères - bien que nécessaire et indispensable -, par le fait qu'il s'assigne des objectifs plus précis. D'une part, l'identification met l'accent sur le caractère continu des circulations profondes des eaux souterraines entre les sous-bassins du grand bassin du Niger ; aussi, les aquifères suivants, représentatifs d'un sous-bassin donné, illustreront notre travail : le Cambro-Ordovicien dans le Tin Séririne, le Groupe des grès d'Agadès dans l'Irhazer, et enfin le Continental intercalaire CI dans l'Iullemeden ; l'aquifère du Dévonien inférieur sera également pris en compte puisque bien développé à la fois dans les trois bassins. D'autre part, l'identification doit s'achever par une synthèse hydrodynamique exprimée sous forme cartographique [Dodo & Bouzelboudjen, 1992] qui est à la base de la réflexion hydrogéologique des grands ensembles aquifères en vue de leur modélisation. L'OACT nous a donné l'occasion de présenter pour la première fois la maquette de la carte hydrogéologique aux 1:5'00'000 et 1:2'000'000 de l'Irhazer lors de sa Quatrième Réunion d'Experts du PCHIA tenue à Nairobi (Kenya) du 13 au 17 mars 1991 [Dodo et al., 1991].

### **Les modèles conceptuels d'écoulement souterrain**

Si le modèle n'est que la représentation plus ou moins abstraite de la réalité, alors la synthèse d'observations hydrogéologiques réelles disponibles et des résultats d'interprétation devra s'achever par

la proposition d'un modèle conceptuel régional apte à représenter tout ou partie des comportements hydrodynamiques du système réel. La première étape consiste à édifier des modèles conceptuels d'écoulement en coupe verticale entre les sous-bassins du grand bassin du Niger pris deux à deux de manière à expliciter leur continuité hydraulique.

**Il est important de mentionner que l'élaboration et l'interprétation des schémas d'écoulement ne contredisent pas les observations recueillies sur le système réel. Il est clair que l'on pourrait proposer d'autres schémas, mais il faudrait toujours que ces nouveaux projets soient *cohérents* avec les observations réelles.**

### **Conclusion générale et recommandations**

Il convient, au terme de notre travail, de faire le point sur nos investigations en mettant l'accent sur l'aspect méthodologique. Puisse notre contribution guider les travaux de recherches futurs pour améliorer les modèles conceptuels d'écoulement et jeter les bases d'une modélisation bidimensionnelle et tridimensionnelle des aquifères du grand bassin du Niger pour une meilleure gestion de la ressource.

# *Chapitre 2*

*Grands Bassins Sédimentaires  
en Zones Arides*

## Chapitre 2

---

# Grands Bassins Sédimentaires en Zones Arides

2.1. Essai de définition .....	8
2.2. Le grand bassin du Sahara Septentrional.....	9
2.2.1. Le Continental intercalaire CI.....	11
2.2.2. Le Continental Terminal CT.....	11
2.3. Le Grand Bassin Artésien Australien .....	12
2.4. Conclusion .....	12
2.5. Le bassin du Niger.....	14
2.5.1. Grands traits géomorphologiques.....	14
2.5.2. Contexte géologique et hydrogéologique régional .....	14
2.5.3. Structure et géométrie du bassin.....	16
2.5.4. Contexte hydroclimatologique .....	18
2.5.4.1. Les circulations atmosphériques .....	18
2.5.4.2. Les précipitations annuelles Pa .....	19
2.5.4.3. Les précipitations mensuelles Pm.....	19
2.5.4.4. La recharge des aquifères .....	19
2.5.4.5. L'évapotranspiration potentielle Etp.....	22
2.5.4.6. L'hydrographie .....	22
2.5.4.7. Paléohydrologie .....	24

En essayant de comprendre, dans le précédent chapitre, le sujet qui nous a été proposé, nous sommes arrivés, par la force des choses, à approcher l'étude du grand bassin sédimentaire du Niger. Nous jugeons par conséquent nécessaire de rappeler la notion de bassin sédimentaire par une analyse succincte et non exhaustive des cas historiques dans les régions arides et semi-arides. Ce rappel met l'accent sur les traits essentiels d'un bassin sédimentaire sans commune mesure avec les aquifères alluvionnaires des vallées quaternaires.

## 2.1. Essai de définition

Un bassin sédimentaire est une zone subsidente, étendue sur plusieurs centaines à plus d'un million de km<sup>2</sup>. Il est comblé par plus d'un kilomètre de sédiments marins et continentaux (tabl. 1). Il est situé entre et en dehors des zones de boucliers stables, et des ensembles très tectonisés et profondément attaqués par l'érosion [Perrodon, 1985].

Les bassins sédimentaires renferment des systèmes aquifères profonds aux structures et formations hydro-litho-stratigraphiques complexes. Ces aquifères sont pour la plupart multicouches, à nappes libres et (le plus souvent) à nappes captives, intercalés par des formations semi-perméables capacitives [Margat, 1991].

Bassin sédimentaire	Surface (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	Formations aquifères	Qualités physico-chimiques de l'eau		Paramètres hydrodynamiques (valeurs extrêmes)			Alimentation (ressources renouvelables) m <sup>3</sup> /an	Volume total d'eau (réserve) emmagasiné m <sup>3</sup>	Réserve exploitable m <sup>3</sup>
			Résidu sec g/l	Température °C	Transmissivité m <sup>2</sup> /j	Coefficient d'emmagas. 10 <sup>-2</sup>	Porosité utile %			
Nubien - Bassin de Kufrah - "Nouvelle Vallée"	1 800	Grès et sables (Cambrien → Crétacé sup. I)	0,15 à 0,25		250 à 3 000	≈ 0,5	11 à 25	1,10 <sup>6</sup>	6,10 <sup>12</sup>	
		Ep. max = 3 500 m	0,1 à 0,8		500 à 5 500	0,1 à 1	10			
Australien	1 700	Sables et grès (Trias → Crétacé) Ep. max = 3 000 m	0,5 à 1	30 à 50 (max. 100)	1 à 2 000	0,01		1,1,10 <sup>6</sup>	2,10 <sup>12</sup>	2,10 <sup>10</sup>
du Sahara septentrional - Complexe terminal C.T. - Continental intercalaire C.I.	780	Sables et grès (Crétacé sup. → Miocène)	1,5 à 6	80	350 à 25 000	0,5 à 150	20 à 50	5,8,10 <sup>6</sup>	6,10 <sup>12</sup>	
	350									
du Niger (C.I.)	500	Sables et grès du Crétacé sup. Ep. max = 1 000 m Ep. moy = 500 m	< 0,5		1 à 1 000	5	5 à 10	≈ 8,10 <sup>6</sup>		40 à 80,10 <sup>6</sup> pour J. max ≤ 100 m (Mali et Niger)
Sénégal-mauritanien	200	Sables et grès (Maestrichtien) Ep. min = 1 000 m Ep. moy = 200 m	< 1 (sur 2/3)		40 à 1 700	0,1 à 0,3	5	1,3,10 <sup>6</sup>	1,5,10 <sup>12</sup>	
Arizona	(Etat : 295)	Alluvions du Quaternaire						3,7,10 <sup>6</sup>		1 500,10 <sup>6</sup> jusqu'à 366 m de profondeur

Tableau 1 : Ressources et réserves des grands bassins sédimentaires (Extrait de Forkasiewicz & Margat, 1982).

Le taux de renouvellement de beaucoup de ces grands réservoirs peut être inférieur à 10<sup>-4</sup> ou 10<sup>-5</sup> T<sup>-1</sup>, soit des durées de renouvellement de plusieurs millénaires ou dizaines de millénaires [Margat, 1990].

Les eaux sont très anciennes [Melloul, 1976 ; Guendouz, 1985] non parce qu'elles ont été piégées et conservées dès leur pénétration dans le sous-sol sinon depuis les temps géologiques du moins les âges préhistoriques (auxquels cas elles sont qualifiées de "fossiles"), mais parce qu'elles se déplacent très lentement sur des trajectoires immenses jusqu'à moins d'un mètre par an [Margat, 1990 ; 1991 ; 1992]. Leur renouvellement actuel est faible mais non nul. En effet, dans l'absolu, aucun système aquifère n'est totalement déconnecté du cycle général de l'eau, ce qui explique la présence d'eau douce météorique dans les aires d'alimentation périphériques des bassins [Margat, 1991 ; 1992].

Les transmissivités varient de 1 x 10<sup>-2</sup> à 2 x 10<sup>-1</sup> m<sup>2</sup>/s, le coefficient d'emmagasinement de 1 x 10<sup>-5</sup> à 15 x 10<sup>-2</sup> et la porosité efficace de 5% à 30% [Forkasiewicz & Margat, 1982].

Ces grands réservoirs renferment des volumes d'eau peu sensibles (du moins dans les parties captives profondes) aux fluctuations actuelles des conditions hydroclimatiques. Ces réserves se chiffrent en centaines et en milliers de milliards de m<sup>3</sup>. En revanche, la recharge annuelle, très faible par rapport à la réserve, est de l'ordre de 0.6 à 1.5mm/an/km<sup>2</sup>. Par ce rapport très inégal, l'aquifère offre une réserve non renouvelable dont l'exploitation est nécessairement en régime d'épuisement ; celui-ci correspond, en général, non au déstockage effectif des réservoirs, mais aux chutes de pression qui rendent l'eau inexploitable quand les niveaux de pompage s'abaissent au delà des profondeurs de 250 à 300m [Margat, 1992]. Cette vulnérabilité dépend étroitement de la stratégie d'exploitation adoptée. On distingue trois types principaux de stratégie d'exploitation des eaux d'un système aquifère [Margat, 1976 ; Margat & Forkasiewicz, 1982 ; Margat & Saad, 1982 ; Margat, 1982 ; Margat, 1991] :

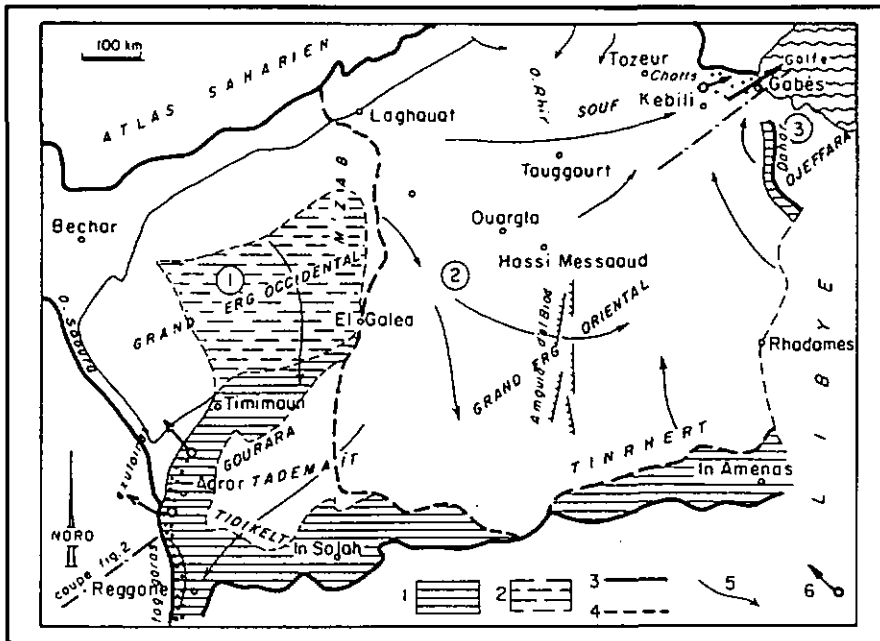
- Exploitation des ressources renouvelables avec rééquilibrage visé à court ou à moyen terme des flux moyens d'alimentation et des niveaux piézométriques moyens.
- Exploitation temporaire volontaire et contrôlée de la réserve d'un aquifère à ressource renouvelable "insuffisante" (au regard des demandes), le déstockage fournissant la majeure partie de la production d'eau pendant une période de déséquilibre assez longue, suivie d'un passage projeté à terme à un régime de rééquilibrage final moyennant alors une réduction ou une suppression de production qui la ramènerait à l'ordre de grandeur du flux de ressource renouvelable, soit un accroissement des apports par alimentation artificielle.
- Exploitation "minièrè" poursuivie jusqu'à ce que les conditions d'exploitation soient jugées impraticables et/ou son coût inacceptable (par rapport aux objectifs d'utilisation de l'eau), puis stoppée. C'est le cas le plus répandu des aquifères captifs profonds des grands bassins sédimentaires en zones arides et hyper-arides. Une cohésion s'impose alors entre la durée et le débit d'exploitation. La métaphore "minièrè" ne peut s'appliquer aux exploitations d'eau souterraine qui tirent sur les réserves aussi simplement à l'instar de celles des ressources non renouvelables minières ou pétrolières purement statiques. "L'exploitation minièrè" a été plus souvent analysée *a posteriori* (conséquence de l'intensification des prélèvements sous la pression des besoins) que programmée (actions intentionnelles, délibérées et planifiées).

Afin d'illustrer cet essai de définition, nous avons choisi deux cas historiques, l'un dans le continent africain, le bassin du Sahara Septentrional, l'autre, le grand bassin australien. Ce choix réside sur le fait que ces deux cas représentent les *premières études de référence* en zone aride, d'une part sur l'évaluation des principales ressources en eaux souterraines d'un bassin sédimentaire, d'autre part, comme des exemples de démonstration d'analyse *a posteriori* de la ressource.

## 2.2. Le grand bassin du Sahara Septentrional

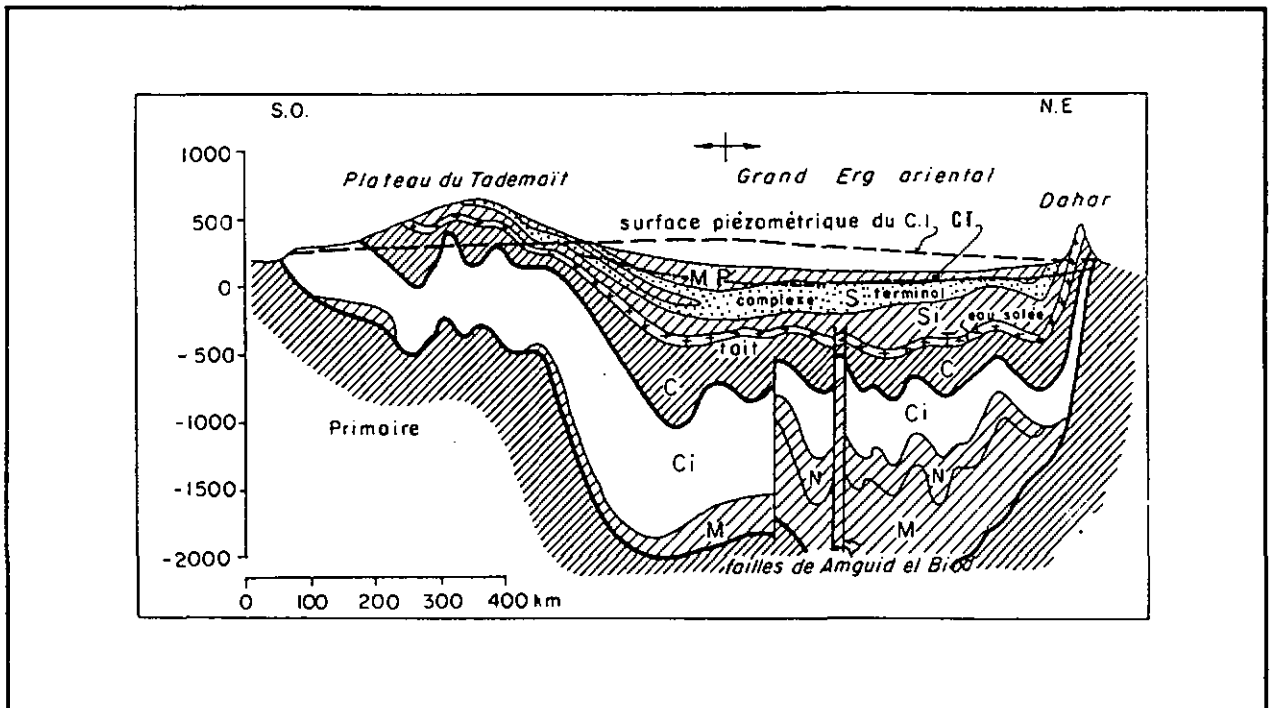
L'essentiel est tiré des travaux collectifs de l'UNESCO [Anon/UNESCO, 1972].

L'intensification de l'exploitation des réservoirs profonds par la multiplication du nombre des forages a engendré le tarissement progressif des résurgences naturelles et la disparition de l'artésianisme nécessitant le recours au pompage. C'est ainsi qu'un certain nombre d'études ont vu le jour et ont apporté une contribution précieuse à la connaissance du fonctionnement hydraulique des nappes sahariennes. Cependant, l'ampleur et l'acuité de ces prélèvements sans cesse croissants étaient telles que les responsables algériens et tunisiens décidèrent de mettre en œuvre, avec les moyens nouveaux qu'offraient les modèles de simulation, une vaste étude de synthèse des différents systèmes aquifères sahariens afin d'aboutir à une politique cohérente de gestion des ressources en eau. Les principales ressources en eaux souterraines sont localisées dans deux aquifères importants : le Continental intercalaire CI et le Continental terminal CT (fig. 3).



Cadre général du système aquifère du Continental intercalaire CI.

1. Affleurements de la formation ; 2. Affleurements sous le Grand Erg occidental (drainance) ; 3. Limites du bassin hydrogéologique ; 4. Ligne de partage des eaux souterraines ; 5. Direction de l'écoulement souterrain ; 6. Exutoires principaux. 1 sous-bassin occidental ; 2 sous-bassin oriental ; 3 sous-bassin de la Djefara.



Coupe hydrogéologique schématique à travers le Sahara septentrional.

Q : Quaternaire ; MP : Miopliocène imperméable ; Pontien : Pontien sableux ; E : Eocène imperméable ; Ss : Sénonien supérieur carbonaté ; E + Ss = Aquifère du Complexe terminal CT au sens large ; Si : Sénonien inférieur argilo-gypseux ; T : Turonien dolomitique ; C : Cénomanien argileux + gypse + anhydrite imperméable ; V : Vraconien argileux ; A : Albien argileux ; N : Néocomien argileux ; CI : Aquifère du Continental intercalaire ; M : Malm ; J : Jurassique indéterminé ; P : Primaire.

Figure 3 : Bassin sédimentaire du Sahara septentrional : systèmes aquifères du Continental intercalaire CI et du Complexe terminal CT (Anon/Unesco, 1972).

### 2.2.1. Le Continental intercalaire CI

Il est constitué de dépôts continentaux sablo-gréseux et sablo-argileux du Crétacé inférieur. Il repose sur les formations argilo-sableuses, argileuses ou carbonatées et est couvert sur la majeure partie du territoire, de séries argileuses avec évaporites du Crétacé supérieur. Il est étendu sur 600'000 km<sup>2</sup>. Sa puissance utile varie de 120 à 1000m. Les valeurs de transmissivité varient de 6 à  $3 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$  et celles du coefficient d'emmagasinement de 1 à  $50 \times 10^{-3}$ . L'aquifère est de type général à nappe captive, avec des secteurs à nappe libre à proximité des affleurements.

L'aquifère peut être alimenté par le piémont sud-atlasique du nord-ouest, le plateau du Tinrherth au sud-est et le Dahar en Tunisie. Les eaux en provenance du nord-ouest se divisent sur l'axe de la dorsale du M'Zab, approximativement suivant deux directions : une partie vers le sud et le sud-ouest, l'autre partie vers l'exutoire tunisien d'est en ouest. Les eaux en provenance du plateau du Tinrherth s'écoulent vers le nord-est sous l'erg oriental en direction de l'exutoire ainsi que les eaux infiltrées sur le Dahar. La minéralisation évolue d'une façon continue, en croissant des zones d'alimentation (0.5g/l) vers les exutoires (5g/l). Les eaux présentent un faciès sulfato-chloruré et sont saturées en calcite, en dolomite et en silice, mais restent sous-saturées en gypse. Les teneurs en <sup>14</sup>C sont de l'ordre de la limite de détection (<< 1%PMC). Les "âges" déterminés par le chronomètre <sup>36</sup>Cl varient de 100'000ans à 500'000ans [Guendouz, 1985].

La croissance des prélèvements par débit artésien ou par pompage a provoqué des baisses sensibles du niveau piézométrique (29m au maximum). Deux modèles de simulation numérique ont été établis. Le premier, en régime permanent, est destiné à vérifier la cohérence des observations sur les transmissivités, les potentiels hydrauliques et les conditions aux limites représentant l'état de la nappe comme stable en 1956 et préciser le bilan. Le second, en régime transitoire, a permis d'estimer la distribution des coefficients d'emmagasinement par ajustement sur l'évolution observée entre 1956 et 1970 [Anon/UNESCO, 1972], et utilisé pour la prévision des baisses des niveaux piézométriques selon les différentes hypothèses de prélèvements projetés en l'an 2000, puis de calculer les coûts prévisionnels de production de l'eau et les investissements nécessités par un objectif de production donnée.

### 2.2.2. Le Continental Terminal CT<sup>1</sup>

Il regroupe plusieurs aquifères situés dans les formations carbonatées du Sénonien et de l'Eocène et sableuses du Mio-Pliocène (CT proprement dit). Il repose sur les formations lagunaires argilo-gypseuses du Sénonien inférieur et est recouvert, en général, d'argiles plus ou moins sableuses du sommet du Mio-Pliocène. Il couvre une superficie de 300'000 km<sup>2</sup>. Sa puissance utile varie de 50 à 1000m. Les valeurs de transmissivité varient de 4 à  $300 \times 10^3 \text{m}^2/\text{s}$ , celles du coefficient d'emmagasinement de 0.5 à  $150 \times 10^{-3}$ . Le système aquifère du CT est de type nappe libre sauf dans le centre du bassin où les eaux sont captives. Dans le grand erg occidental, les eaux s'écoulent du nord-ouest vers le sud-est tandis que dans l'erg oriental, elles évoluent du sud vers le nord. La différence de niveau piézométrique entre le CI et le CT peut atteindre 300m. La minéralisation totale tend en général à augmenter du sud (2g/l) vers les exutoires au nord (6 à 8g/l). Les teneurs en <sup>14</sup>C permettent d'affirmer qu'une recharge actuelle a effectivement lieu sur les zones d'alimentation.

Deux modèles de simulation, en régimes permanent et transitoire, ont été développés comme pour le réservoir profond du Continental intercalaire [Anon/UNESCO, 1972].

<sup>1</sup> Continental Terminal CT et Complexe Terminal CT ne font qu'un.

### 2.3. Le Grand Bassin Artésien Australien

L'essentiel de ce rappel non exhaustif est tiré des travaux de **Habermehl [1980]**.

Aux environs de 1880, la surface piézométrique des aquifères inférieurs était, dans tout le bassin, au-dessus du sol. L'exploitation, sans cesse croissante, a abaissé les niveaux de pompage jusqu'à 120m. Sur les 4700 forages jaillissants initialement sur un total de 22770 forages (en 1974), environ 1000 ont cessé de jaillir entre 1890 et 1970. Ces prélèvements, dans certaines régions, ont considérablement modifié la forme de la surface piézométrique au point d'augmenter les gradients hydrauliques.

Le réservoir est un ensemble d'aquifères sablo-gréseux qui s'échelonnent du Perno-Trias au Crétacé (fig. 4). Il couvre une superficie de 1'700'000 km<sup>2</sup>. Son épaisseur maximale est de 3000m dans une disposition synclinale d'axe NE-SW. Les valeurs de transmissivité varient de  $2 \times 10^{-2}$  à  $1 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s ; la perméabilité horizontale varie de  $1 \times 10^{-4}$  à  $1 \times 10^{-5}$  m/s, et la perméabilité verticale moyenne de  $1 \times 10^{-6}$  à  $1 \times 10^{-10}$  m/s. Le coefficient d'emmagasinement moyen est de  $1 \times 10^{-5}$ .

Excepté dans les zones d'affleurements, l'aquifère est de type captif artésien. L'écoulement général est dirigé du nord-est vers le sud-ouest, de la zone d'alimentation principale vers l'aire d'émergence constituée de sources dont le débit individuel peut atteindre 85 l/s. Le gradient hydraulique moyen est de l'ordre de  $5 \times 10^{-4}$  et la vitesse moyenne d'écoulement de 1 à 5m/an. Les apports sont assurés par l'infiltration des eaux de ruissellement et des précipitations sur les affleurements. La minéralisation totale augmente du nord-est (0.2g/l) vers l'exutoire (5g/l). Les eaux sont en général bicarbonatées sodiques sauf à l'ouest du bassin où elles sont chlorurées et sulfatées sodiques [**Herczeg et al., 1991**]. Le volume d'eau prélevé dans le bassin (1890-1970) est de 48 milliards de m<sup>3</sup> soit 44 milliards de m<sup>3</sup> issus de la réserve. Les débits des forages jaillissants dont certains atteignent 2000m de profondeur, vont jusqu'à 10'000m<sup>3</sup>/j.

Un modèle de simulation numérique a été réalisé pour prévoir le comportement du système, suite aux différentes interventions d'aménagement. Le modèle (assez simplifié), est caractérisé par deux aquifères captifs connectés entre eux par la drainance à travers les couches semi-perméables. Les résultats, très satisfaisants, ont conduit à une meilleure compréhension de l'évolution historique de l'exploitation (1880-1970) caractérisée par une augmentation initiale du débit suivie de sa diminution et finalement d'une tendance à un nouvel équilibre global. Le modèle n'est applicable que pour des prévisions à l'échelle régionale (changements de la surface piézométrique, extension des rabattements, évolution des débits) mais non pour la simulation d'effets locaux et le contrôle individuel des forages.

### 24. Conclusion

L'intensification des prélèvements, sous la pression des besoins, a eu pour conséquence une exploitation "minièrè" des ressources en eaux souterraines avec des abaissements sensibles de niveau (29m en 14ans pour le Sahara septentrional ; 120m en 83ans pour le bassin australien) plutôt qu'une gestion programmée.

S'ils nous enseignent sur le type d'exploitation ("minièrè") à éviter, en revanche, ces deux exemples ont le mérite d'illustrer une analyse *a posteriori* de ce qui est réalisable [**Margat, 1982**] à savoir :

- l'aspect méthodologique mettant l'accent sur l'approche globale dans la compréhension du comportement hydrodynamique des réservoirs;
- l'adéquation des modèles mathématiques bidimensionnels et tridimensionnels calibrés par la reproductibilité de l'historique d'évolution des prélèvements et des niveaux piézométriques, avant d'être opérationnels (modèles de prévision) ;

DEUXIEME PARTIE : Les Grands Bassins Sédimentaires en Zones Arides

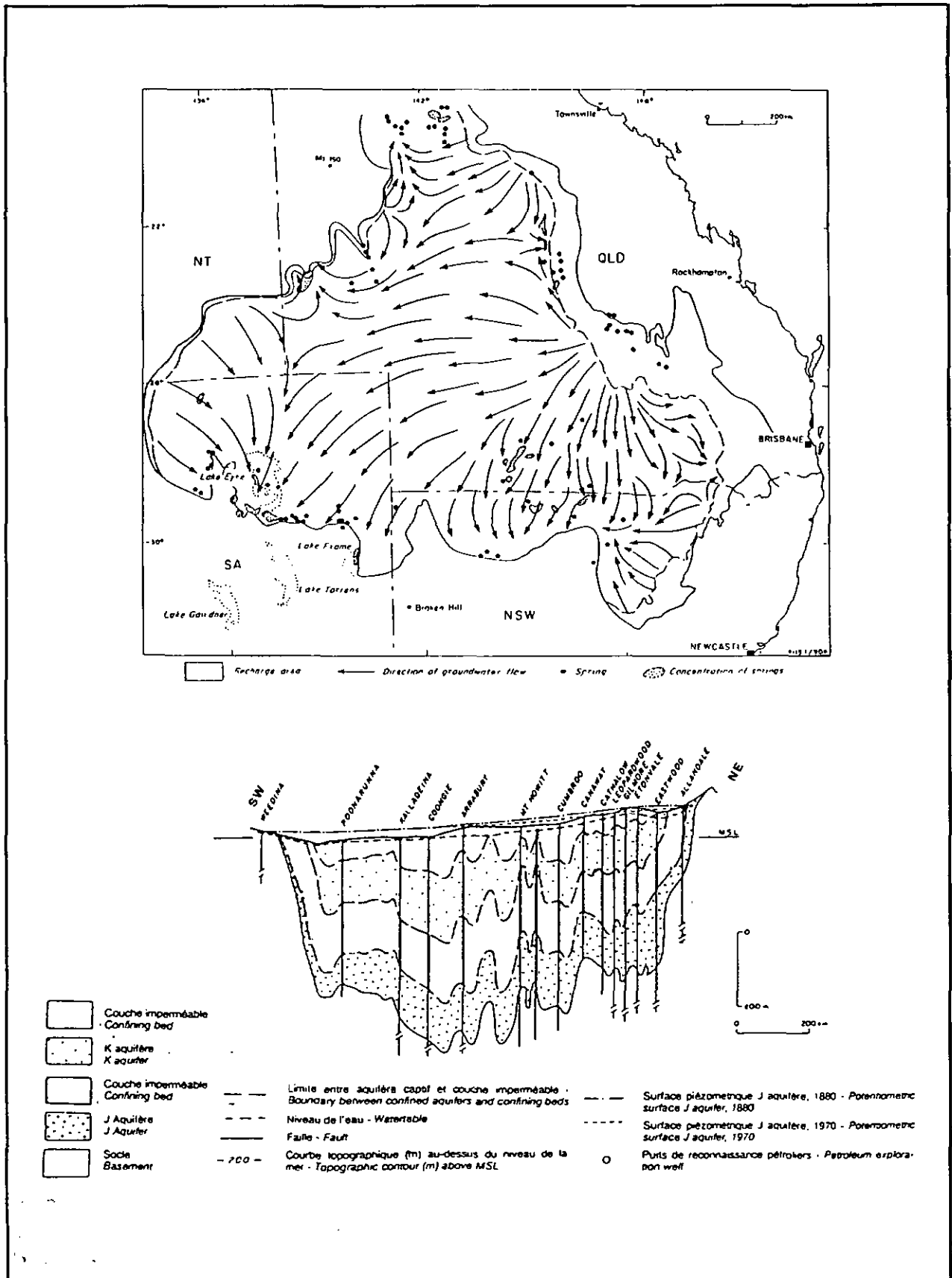


Figure 4 : Le grand bassin artésien australien (extrait de M.A. Habermehl, 1980). A.- Alimentation et zones d'émergence naturelle (sources) et direction de l'écoulement souterrain. B.- Coupe hydrogéologique NE-SW.

- l'adéquation des modèles mathématiques bidimensionnels et tridimensionnels calibrés par la reproductibilité de l'historique d'évolution des prélèvements et des niveaux piézométriques, avant d'être opérationnels (modèles de prévision) ;
- la **gestion concertée** des ressources (cas du Sahara Septentrional) nécessitant la création d'une commission mixte dont le rôle essentiel était de confronter et de coordonner les exploitations des eaux.

Le bassin du Niger, bien qu'intéressant cinq pays (Algérie, Bénin, Mali, Niger principalement, Nigéria), offre des réserves en eau souterraine relativement **épargnées d'une exploitation intensive** ; leur **exploitation est plutôt à ses débuts**. La formulation des termes de choix d'une stratégie d'exploitation présente et future des réservoirs du bassin du Niger devrait d'abord passer par les étapes d'identification et de compréhension du fonctionnement de ces aquifères, but de notre travail. Nous allons présenter succinctement les grands traits marquants du bassin du Niger dans son contexte hydrogéologique et hydroclimatologique régional.

## 2.5. Le bassin du Niger

Il est partagé par l'Algérie, le Bénin, le Mali, le Niger principalement, et le Nigéria (fig. 5). Il est encadré par les boucliers de la zone mobile panafricaine (boucliers Touareg au nord, Nigérian au sud), celui du craton ouest africain (bouclier du Man à l'ouest), le graben de Téfidet-Kafra-Ténére-Termit à l'est, et enfin le fossé de Maiduguri au Nigéria au sud-est. Il communique avec les aquifères du bassin de Taoudenni-Tanezrouft (Mali-Algérie) par le graben de Gao. Il est composé de plusieurs sous-bassins : Tin Séririne-Irhazer (Algérie-Niger) au nord comblé des réservoirs paléozoïques et mésozoïques, Tamesna (Algérie-Mali-Niger) au nord-ouest formé des réservoirs paléozoïques et mésozoïques (Continental intercalaire CI *senso stricto*), et enfin Iullemeden (Mali, Niger, Nigéria, Bénin) renfermant les réservoirs du CI et Continental terminal CT. Le Tamesna est en réalité la partie septentrionale d'Iullemeden.

### 2.5.1. Grands traits géomorphologiques

Le bassin du Niger correspond à une pénéplaine dont l'altitude est comprise entre 250 et 500 mètres. Les points culminants (>1000m) sont situés au nord dans les massifs du Hoggar (2908m), l'Aïr (2022m) et l'Adrar des Iforas, au sud, dans le plateau de Jos (2010m). Les massifs sont entourés par une ceinture tassilienne dont l'altitude varie entre 500 et 750m. Les points bas (<250m) sont représentés par la vallée du fleuve Niger à l'ouest et le lac Tchad à l'est.

### 2.5.2. Contexte géologique et hydrogéologique régional

Nous rappelons très brièvement les grandes étapes marquant la géologie et l'hydrogéologie du Niger [Joulié, 1963 ; Bigotte & Obelliane, 1968 ; Valsardieu, 1970 ; Greigert, 1978 ; Bellion, 1987].

Par opposition au craton ouest africain stable depuis l'orogénèse éburnéenne (1600Ma environ), la zone cratonique du bouclier Touareg n'acquiert sa stabilité qu'après les plissements et les réajustements qui affectent les molasses de la chaîne panafricaine aux alentours de 550Ma (orogénèse africaine).

Le bouclier Touareg, composé du Hoggar et de ses deux apophyses l'Aïr et l'Adrar des Iforas, est entouré de terrains sédimentaires paléozoïques (du Cambrien au Carbonifère) formant les ceintures tassiliennes (Tassilis N'Ajjers au nord dans le grand bassin du Sahara septentrional et les Tassilis Ouan Ahaggar au sud dans le sous-bassin de Tin Séririne). C'est dans ces formations paléozoïques que se formera les aquifères du Cambro-Ordovicien, du Dévonien inférieur et du Carbonifère inférieur dans le synclinal de Tin Séririne. Ce dernier marque l'amorce vers le sud du sous-bassin de l'Irhazer.

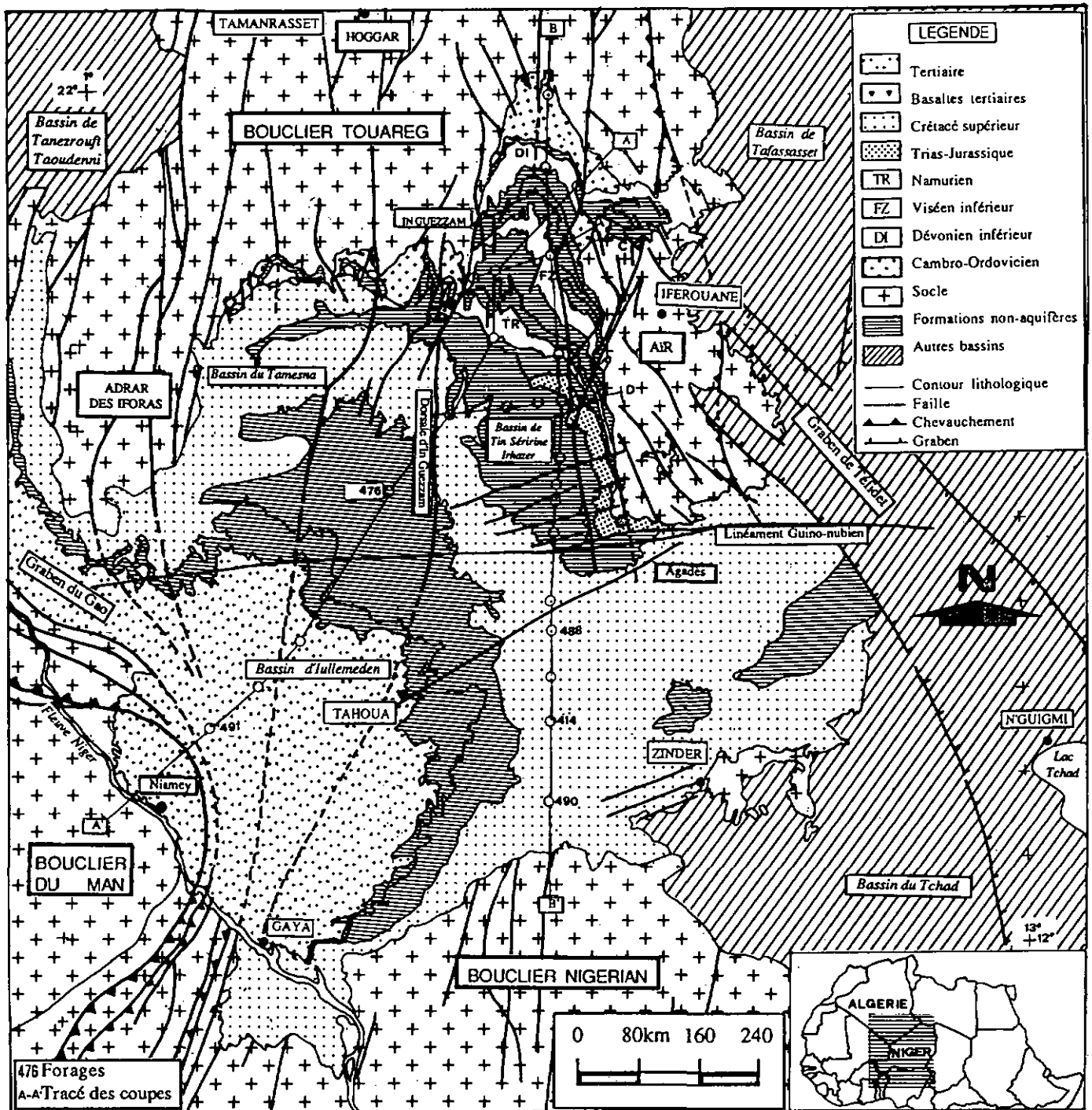


Figure 5 : Cadre géographique et géologique du grand bassin sédimentaire du Niger.

Après l'orogénèse hercynienne qui a affecté la zone panafricaine par des mouvements d'ensemble (affaissement ou soulèvement), par gauchissements ou par fractures, a suivi une grande période continentale (à partir du Permien) marquée par un faciès rouge (gris jusqu'au Namurien) qui s'achève avec l'arrivée de la transgression marine au Cénomanién supérieur. C'est pendant cette période que se déposèrent les sédiments fluvio-lacustres (grès, argiles) et volcano-sédimentaires (analcimolites) qui constitueront par la suite le plus grand réservoir de l'Afrique de l'Ouest : le Continental intercalaire CI.

La régression marine n'ayant pas été simultanée partout en Afrique Occidentale, les limites chronologiques du CI varient d'une région à l'autre : du Néocomien à l'Aptien inférieur dans le bassin du Sahara Septentrional (Algérie-Tunisie) ; du Jurassique (?) au Crétacé inférieur dans le bassin de Taoudenni-Tanezrouft (Mali-Algérie) ; du Jurassique au Crétacé inférieur (Wealdien) dans le bassin tchadien. **Dans le bassin du Niger, le CI au sens large s'étend du Permien au Cénomanién supérieur. Le grand réservoir du CI au sens strict correspond aux grès grossiers du Crétacé supérieur regroupant la série du Tégama, la formation du Farak et le Continental hamadien, l'ensemble étant épais de plus de 1000m.**

Après cette invasion marine jusqu'au Paléocène, les grès rouges et argilo-sableux marquent le retour d'une sédimentation continentale qui constitue les dépôts aquifères du Continental terminal CT (Eocène, Mio-Pliocène, Quaternaire). Cette période se traduit par la présence du couloir linéaire guino-nubien.

### 2.5.3. Structure et géométrie du bassin

Le bassin est comblé par plus de 3500m de sédiments (3810m au forage de Madama) échelonnés du Cambrien au Quaternaire. Les formations les plus jeunes transgressent les plus anciennes en débordant vers le sud. Le pendage des couches est très faible. La série sédimentaire est affectée par des accidents majeurs subverticaux la plupart hérités du socle (fig. 5, 6).

**La dorsale d'In Guezzam** : c'est un môle qui joue le rôle de haut-fond. Il réduit considérablement l'épaisseur des sédiments paléozoïques (Namurien, Permien). A l'ouest, les données géophysiques (gravimétrie, magnétométrie) estiment le socle atteignable à plus 2000m de profondeur [Greigert, 1967].

**Le linéament guino-nubien** : il affecte le craton ouest africain et la zone mobile panafricaine depuis la marge sénégal-guinéenne à la Mer Rouge [Bellion et al., 1984 ; Bellion, 1987]. Il intègre le graben de Gao qui se superpose à la suture panafricaine (voir alinéas suivant). Dans la partie méridionale de l'Irhazer, son rejet est d'au moins 50m ; il atteint 300m au centre du bassin du Niger. Il est responsable de la remontée du socle au sud du massif de l'Aïr [Anon/COGEMA, 1981].

**La suture panafricaine** : elle est le lieu géométrique de la collision entre le craton ouest africain et la zone panafricaine. Elle représente la limite sud-ouest de l'aquifère du CI. Son rejet est d'au moins 1000m (le forage pétrolier de Combretum a atteint le socle à 1250m, N°491 de la figure 6A).

**Le graben de Téfidet (Téfidet-Katra-Ténére-Termit)** : c'est un ensemble de fossés NW-SE qui communiquent avec le bassin de la Haute Bénoué par la branche de la Gongola et le fossé NE-SW de Maiduguri au Nigéria [Bellion, 1987]. Son rejet est d'au moins 1000m. Cette zone de faiblesse a engendré un bassin structural profond ; des forages pétroliers de plus de 4000m n'ont pas atteint le socle.

**En résumé**, la structure du bassin du Niger est complexe ; son découpage par des discontinuités transcrationnelles de plusieurs centaines de kilomètres permet de se faire une idée de l'allure du fond du bassin sous sa couverture sédimentaire.

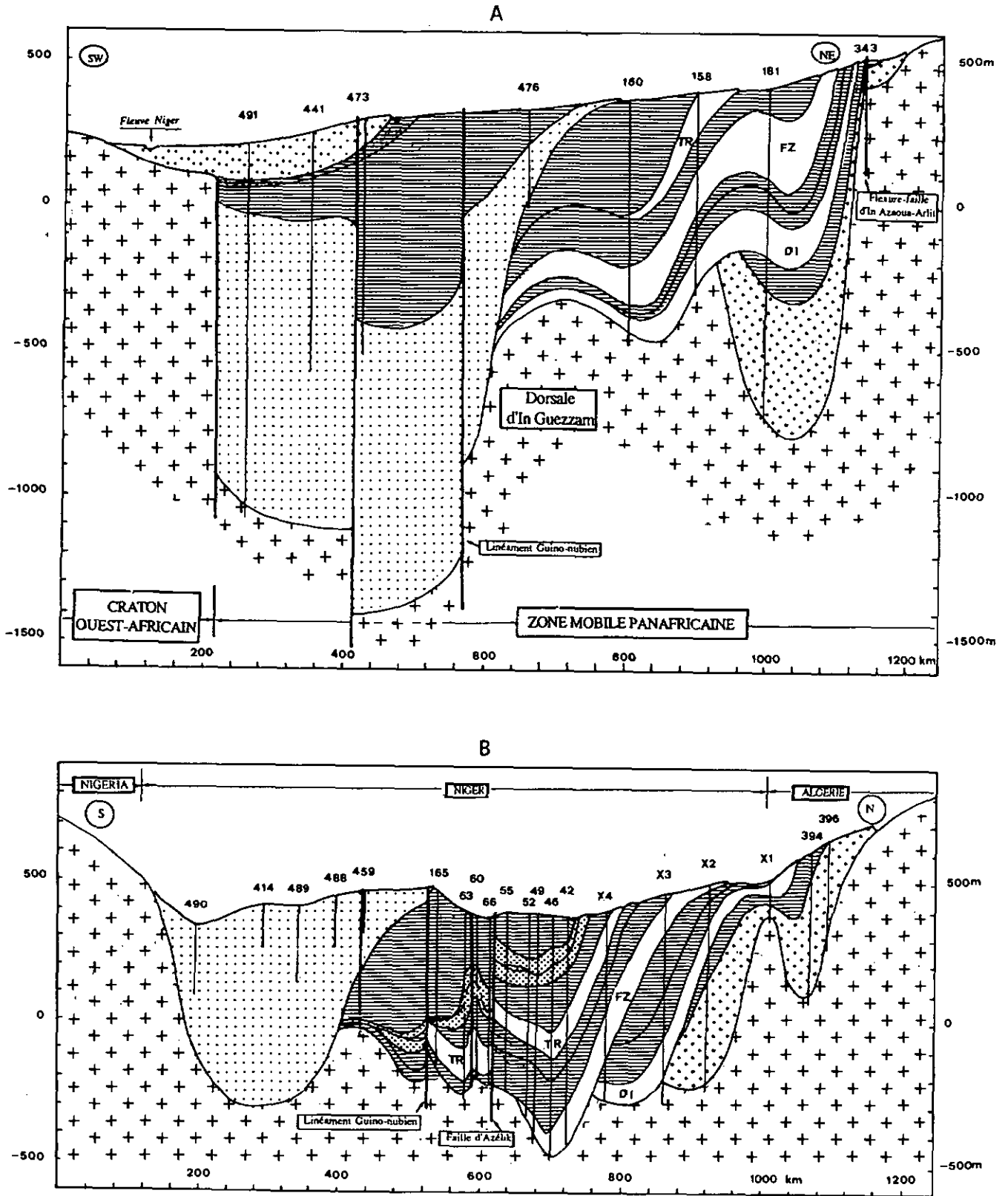


Figure 6 : Structure du bassin du Niger (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM, No1-2, 1992).

## 2.5.4. Contexte hydroclimatologique

Notre intention n'est pas de mener une étude complète du climat nigérien, mais de présenter la répartition géographique de certains facteurs climatiques (précipitations, évapotranspiration) et géomorphologiques (réseau hydrographique) qui ont particulièrement retenu notre attention. En effet, leur évolution spatio-temporelle est importante pour ses conséquences sur la recharge des aquifères notamment les principales aires d'alimentation du bassin et sur les remplissages quaternaires des lits d'oueds. Les données hydroclimatiques proviennent du Service National de la Météorologie qui gère l'ensemble du réseau dont l'installation de la première station (Zinder) remonte à 1905.

Remarquons que les régions septentrionales reçoivent des pluies très irrégulières dans le temps et en quantités très faibles. La moyenne a tendance à surestimer ces quantités par rapport aux médianes [Morel, 1992]. Aussi ferons-nous appel aux médianes pour une répartition spatiale et aux moyennes pour comparer les stations sélectionnées. Auparavant, nous allons essayer de comprendre les mécanismes climatiques à la lumière des études les plus récentes [Sircoulon, 1977 ; Rognon, 1989 ; Morel, 1992].

### 2.5.4.1. LES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES

Le climat saharien obéit au schéma global de circulation atmosphérique (fig. 7) qui consiste en un échange entre la zone de basses pressions et celles des hautes pressions subtropicales dues aux courants de basse altitude (alizés) et les courants de hautes pressions.

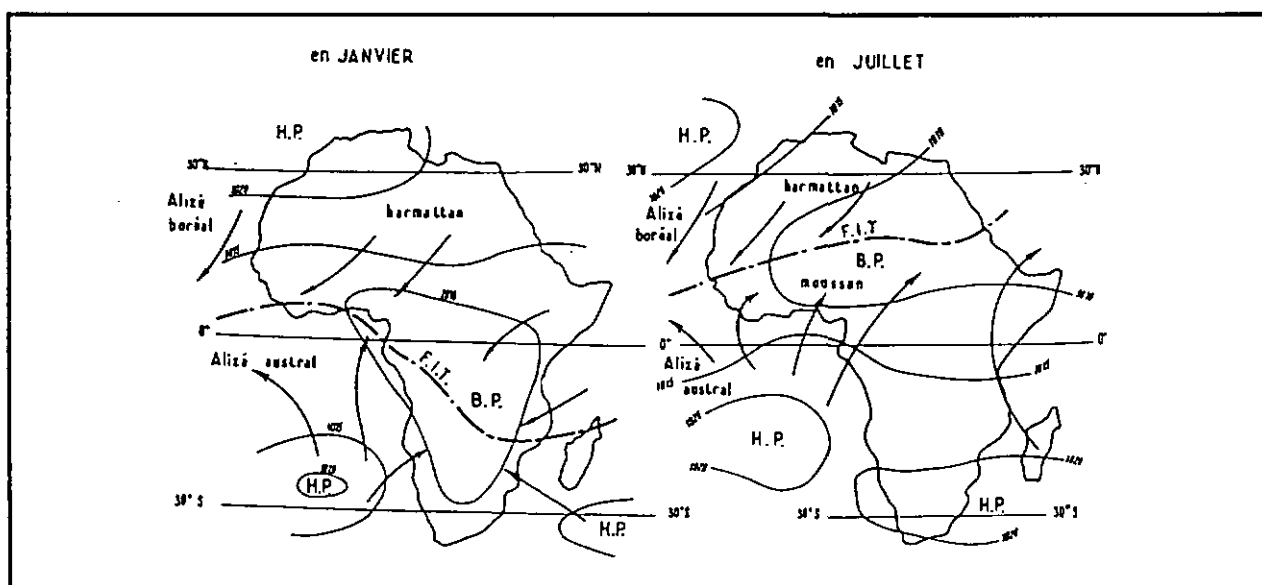


Figure 7 : Variations extrêmes du Front Intertropical FIT (Sircoulon, 1976).

**Les hautes pressions :** le système de hautes pressions sahariennes est alimenté par des afflux d'air variés du sud (le contre-alizé), le Jet-Stream, les coulées polaires du nord et les Jets-Streams d'ouest.

Le contre-alizé s'élève à haute altitude jusqu'à plus de 12'000m dans la "*cheminée équatoriale*" ou la *convergence intertropicale CIT*. Il a tendance à dériver vers le nord ou vers le sud en s'affaissant particulièrement en juillet-septembre. Au-dessus du Sahara, il se tasse vers le sol, se comprime et se réchauffe. Il est dévié vers la droite selon un mouvement circulaire dans le sens des aiguilles d'une montre et donne naissance à un vaste tourbillon : la *cellule anticyclonique*. Celle-ci est alimentée en permanence par l'air supérieur desséché qui maintient un régime de hautes pressions et bloque les ascendances de l'air saharien. Celui-ci, comprimé, tend alors à s'échapper obliquement vers la périphérie à la partie inférieure de l'anticyclone et donne naissance à un vent chaud et sec : l'*harmattan*. C'est l'*alizé boréal continental*

responsable de la sécheresse rigoureuse qui dure 9 à 10 mois sur une grande partie de l'Afrique de l'Ouest. Il ramène l'air saharien vers les régions équatoriales. Lorsqu'il rencontre l'*alizé austral*, il s'élève en altitude et alimente à nouveau le *contre-alizé*. Ce tourbillon à axe horizontal est la *cellule de Hadley*.

Pour compenser l'évasion permanente d'air à sa base et maintenir sa pression, l'anticyclone saharien est alimenté constamment, dans les basses couches, par un afflux d'air qui arrive sur la frange nord du Sahara : les *coulées d'air polaire*.

Les *Jets-Streams*, courants très rapides qui parcourent la très haute atmosphère, contribuent à renforcer la cohésion de l'anticyclone saharien. Deux d'entre eux au moins encadrent le Sahara, la vitesse du jet subtropical d'ouest augmente en passant de l'Atlantique au Sahara. Ce jet est engendré par la branche subsidente des cellules de Walker qui apparaissent le long des latitudes. Au sud du Sahara, arrivent un ou plusieurs jets d'est vers 14000m d'altitude.

**Les basses pressions :** Pendant l'été boréal, l'*anticyclone de Saint-Hélène*, homologue de celui des Açores, se déplace vers l'équateur et propulse l'*alizé maritime austral* vers les côtes du golfe de Guinée. En provenance du sud-est dans l'hémisphère austral, cet air parvient sur le continent africain sous le nom de *mousson africaine*. Lorsque celle-ci parvient à ces altitudes à la fin du printemps, son air plus frais et humide doit s'insinuer en biseau à la base de l'harmattan. Le contact entre ces deux masses d'air a lieu dans une région appelée la *Zone Intertropicale de Convergence (ZITC)*. Leur ligne de rencontre est l'*équateur météorologique*. Leur surface de contact, large de 50 à 250km sur le continent, s'appelle le *Front intertropical FIT*. Les précipitations pluvieuses ont lieu lorsque l'air s'élève suffisamment à la suite soit d'une ascension forcée le long des massifs (tels que le Hoggar, l'Aïr) soit de l'affaiblissement de l'harmattan. Ces conditions favorables donnent naissance à des *fornades* à caractère orageux, qui se déplacent en *ligne de grains* de 10 à 15 m/s vers l'ouest.

Sur les dizaines de stations couvrant tout le bassin (fig. 5), nous avons choisi les plus anciennes (Agadès, Gaya, Iférouane, N'guigmi, Niamey, Tahoua, Tamanrasset, Zinder).

#### 2.5.4.2. LES PRECIPITATIONS ANNUELLES Pa

Au nord (Tamanrasset, In Guezzam, Iférouane, Agadès), les hauteurs de précipitations annuelles n'excèdent guère 300mm (fig. 8) tandis qu'au sud, elles peuvent dépasser 1000mm (Gaya). Dans la partie méridionale du bassin, les hauteurs décroissent d'ouest (Gaya) vers l'est (N'Guigmi). Depuis la période 1940-1960 environ, les précipitations moyennes annuelles ont tendance à diminuer (sauf Gaya dans une moindre mesure) ; elles évoluent vers des saisons de plus en plus sèches. En effet, l'analyse de la pluviométrie, basée sur 900 stations d'observations dans les pays du CILSS depuis 1950, définit une *période humide de 1950 à 1967* et une *période sèche de 1968 à 1985*. Au cours des vingt (20) dernières années, les isohyètes ont sensiblement évolué vers le sud ; dans notre bassin, l'isohyète 250mm a réculé de 300km vers le sud au droit de Tahoua [Morel, 1992].

#### 2.5.4.3. LES PRECIPITATIONS MENSUELLES Pm

Elles traduisent l'évolution spatio-temporelle de l'équateur météorologique (fig. 9). Elles ne dépassent pas 80mm au Nord (Tamanrasset, In Guezzam, Iférouane, Agadès) contrairement au sud (plus de 250mm à Gaya). Les pluies tombent presque partout de mai à septembre avec des maximas en août. La distribution des pluies est unimodale sauf au nord dans les massifs (Tamanrasset, Iférouane) qui bénéficient d'effets orographiques ; les pluies tombent presque toute l'année.

#### 2.5.4.4. LA RECHARGE DES AQUIFERES

Nous avons présenté un aperçu de l'évolution dans le temps et dans l'espace des précipitations. Il est clair que ces moyennes mensuelles et encore moins annuelles doivent être considérées avec prudence. En effet,

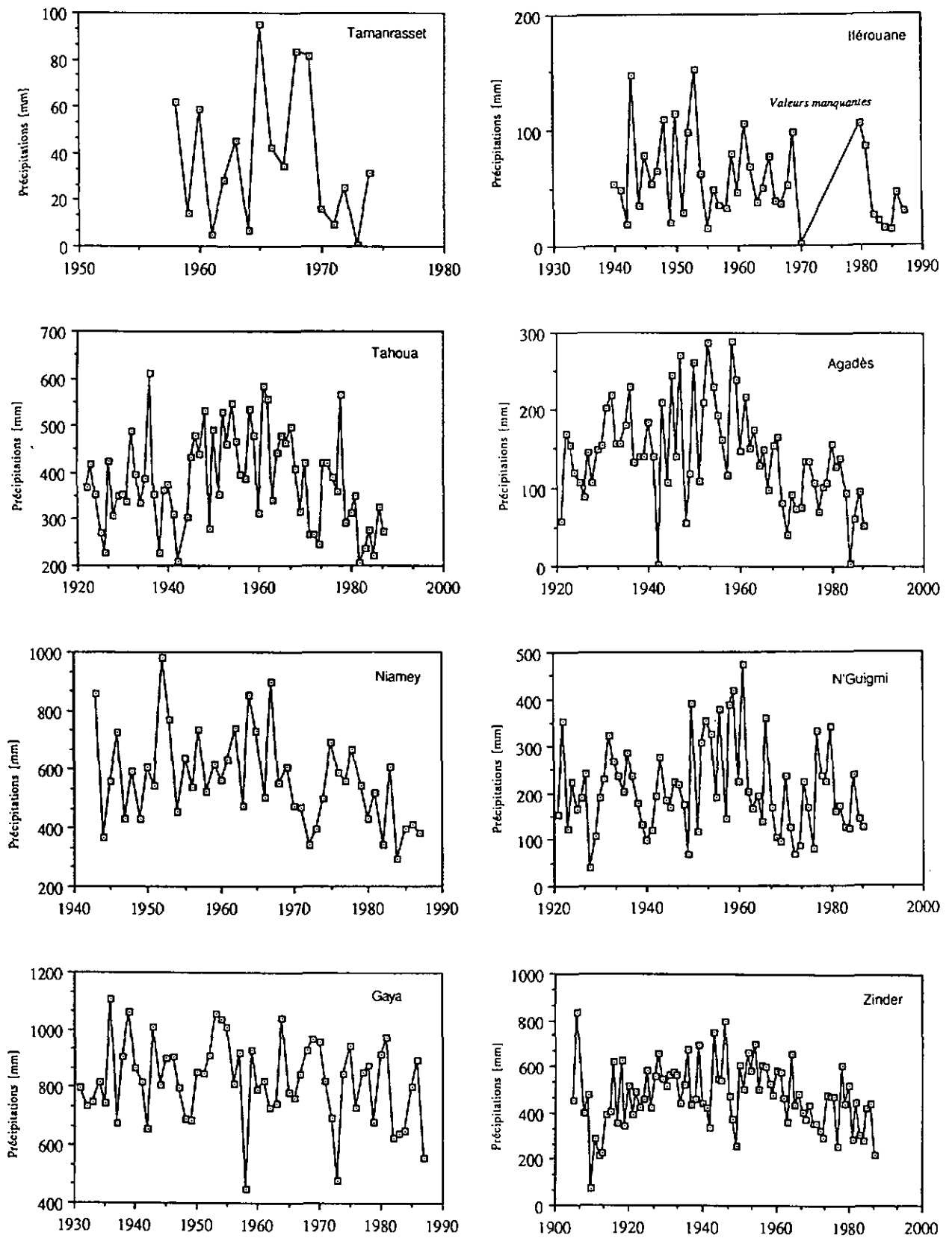


Figure 8: Variation pluriannuelle de la pluie Pa dans le bassin du Niger.

DEUXIEME PARTIE : Les Grands Bassins Sédimentaires en Zones Arides

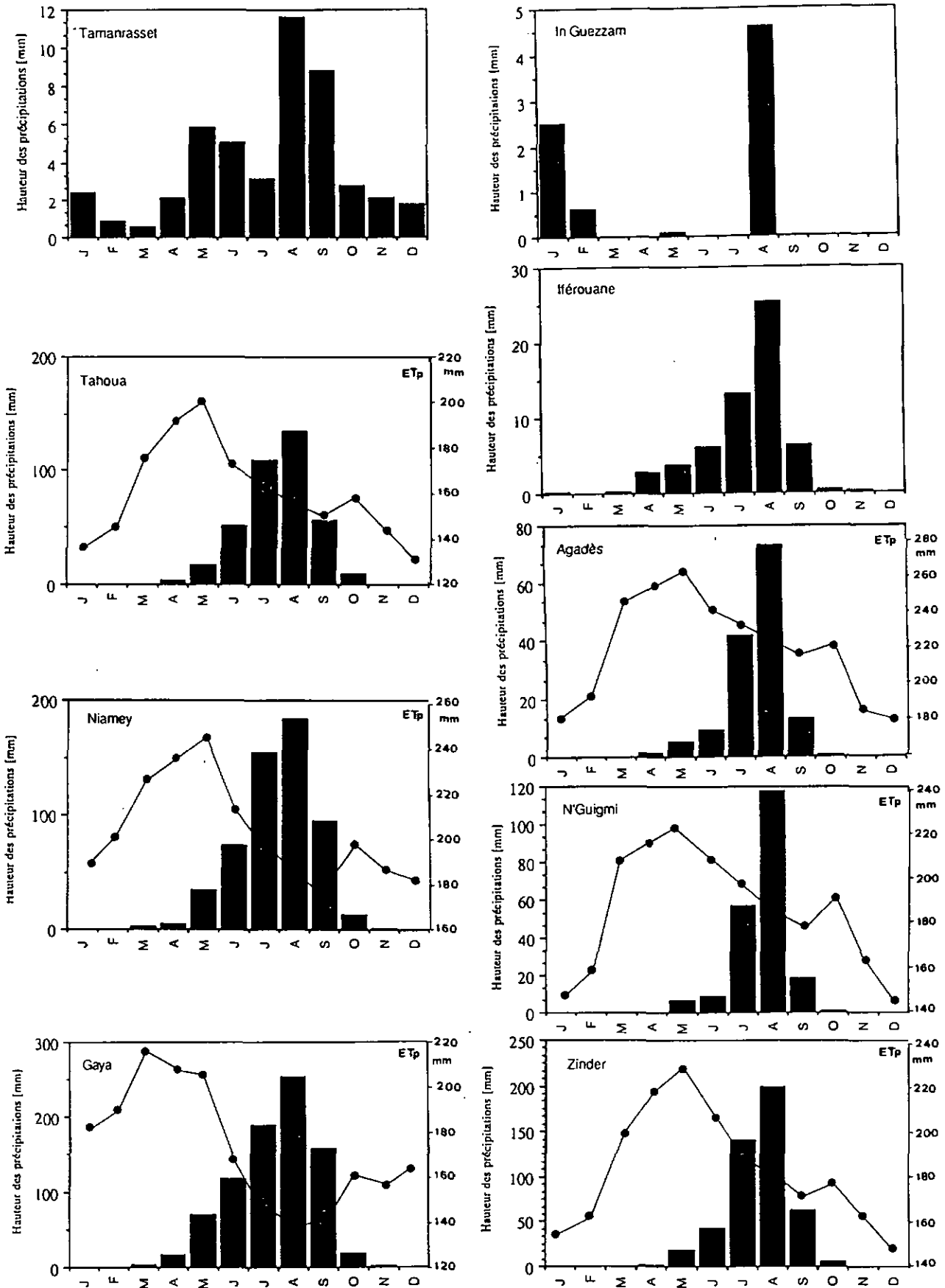


Figure 9: Moyennes mensuelles de la pluie et de l'Evapotranspiration (de Penman) dans le bassin du Niger.

dans les régions arides, seules les crues engendrées lors d'événements pluvieux contribuent à la recharge effective des aquifères. Par exemple, à la suite des crues exceptionnelles de 1986 et 1988 de l'oued Tchirozérine (au nord de l'oued Téloua) dans le périmètre minier de SONICAR [Armand, 1990], une remontée de 20 à 45cm du niveau de la nappe du Jurassique supérieur a été enregistrée lors des relevés piézométriques réguliers. Aussi, l'analyse statistique de ces variables climatiques devrait être réalisée à l'échelle d'épisodes pluvieux.

L'évènement pluvieux caractérise le rapport entre les hauteurs totales des précipitations médianes au nombre de jours de pluies observées, en d'autres termes, les apports d'eau moyens par jour de pluie. Durant la période 1950-1967, des apports d'eau moyens de 5mm/jour ont été obtenus dans le synclinal de Tin Séirine au nord (fig. 10) ; en revanche, depuis 1968, la limite des apports moyens de 5 mm/jour a très sensiblement réculé vers le sud de plusieurs centaines de km [Morel, 1992].

L'infiltration efficace est d'environ 1mm/an sur le bassin [Margat, 1982] ; elle peut atteindre 2mm plus au sud du bassin [Bernert & Nguyen Quan Trac, 1978]. Les apports moyens journaliers sont de l'ordre de grandeur du flux d'apport rapporté aux aires d'alimentation des aquifères [Margat, 1982].

#### 2.5.4.5. L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE ETP

Elle a été obtenue selon la formule de Penman (fig. 9) modifiée par la FAO qui tient compte de l'action du vent en fonction de l'écart des températures extrêmes. Le trait marquant à relever est qu'en dehors du mois d'août (juillet-août pour Gaya), l'évapotranspiration est nettement supérieure aux hauteurs de précipitations moyennes mensuelles.

Le rapport Pm/Etp (tabl. 2), critère de base d'évaluation des degrés d'aridité défini par l'UNESCO [Anon/UNESCO, 1977] et adopté par la FAO pour montrer les régions du monde affectées ou susceptibles d'être affectées par la désertification, a été calculé pour les stations sélectionnées dans le bassin du Niger.

	Agadès	Gaya	N'Guigmi	Niamey	Tahoua	Zinder
Pm/Etp	0.05	0.40	0.10	0.25	0.16	0.22

Tableau 2 : Evaluation des degrés d'aridité dans le bassin du Niger.

Pour les stations au nord (Agadès, Tahoua) et à l'est (N'Guigmi) du bassin, le rapport est compris entre 0.03 et 0.20. Ces stations appartiennent à la zone aride. En revanche, pour les stations au sud du bassin (Gaya, Niamey, Zinder), le rapport est compris entre 0.20 et 0.50, soit la zone semi-aride. Ainsi, le bassin sédimentaire du Niger appartient aux régions arides et semi-arides du monde.

#### 2.5.4.6. L'HYDROGRAPHIE

Le fleuve Niger est le seul cours d'eau qui coule toute l'année (fig. 11). Exceptionnellement, en mai 1985, le cours du fleuve était à sec à Niamey. Il intéresse 9 états (Algérie, Bénin, Burkina, Cameroun, Côte d'Ivoire, Guinée, Mali, Niger, Nigéria). Il prend sa source depuis la Guinée à l'ouest dans le massif du Fouta-Djalon, traverse le Mali, le Niger (sur 400km), et enfin le Nigéria au sud où il se jette en delta dans l'Océan Atlantique après un parcours de 2700km. Son bassin-versant se divise en deux domaines :

- le premier au nord englobe les oueds issus des massifs du bouclier touareg et s'écoulent notamment en août (annexe 1) ; les seuls jaugeages effectués sur l'Irhazer ont donné des valeurs du débit moyen de 4 m<sup>3</sup>/s (1966) et 10 m<sup>3</sup>/s (1967) en basses eaux et 21 m<sup>3</sup>/s en hautes eaux (1967). Actuellement, l'installation de cordons dunaires tend à fossiliser le réseau ;
- le second représente le bassin hydrographique le plus actif.

DEUXIEME PARTIE : Les Grands Bassins Sédimentaires en Zones Arides

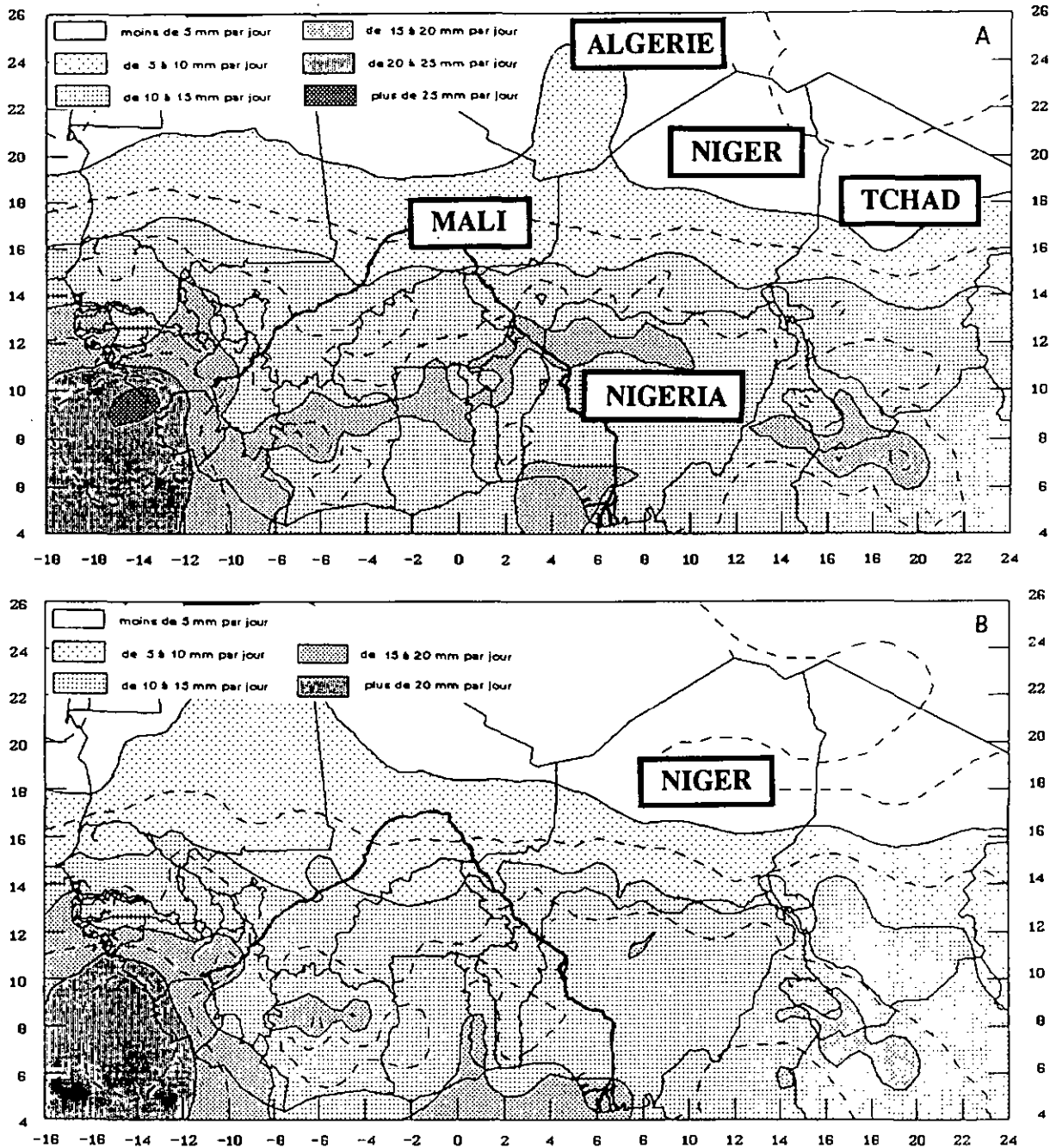


Figure 10 : Apports moyens par jour de la pluie. Période 1950-1967 (A) et 1968-1985 (B) (Morel, 1992).

Ses crues ont lieu en général, au Niger, en décembre-janvier et les étiages en juin-juillet (tabl. 3).

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
Q m <sup>3</sup> /s	100	740	989	1180	1330	1370	1010	429	136	52.6	13.3	34.3

Tableau 3 : Débits moyens mensuels du fleuve Niger à la station de jaugeage de Niamey.

Selon une ligne subméridienne NNW-SSE approximative Agadès-Zinder (fig. 12), on distingue deux bassins-versants : un bassin occidental dont les eaux convergent vers le fleuve, et un bassin oriental dont l'exutoire principal est le lac Tchad (bassin endoréique). Ce lac, profond seulement de 5 à 6m, est surtout tributaire de la Komadougou depuis le Nigéria et le Chari en Centrafrique.

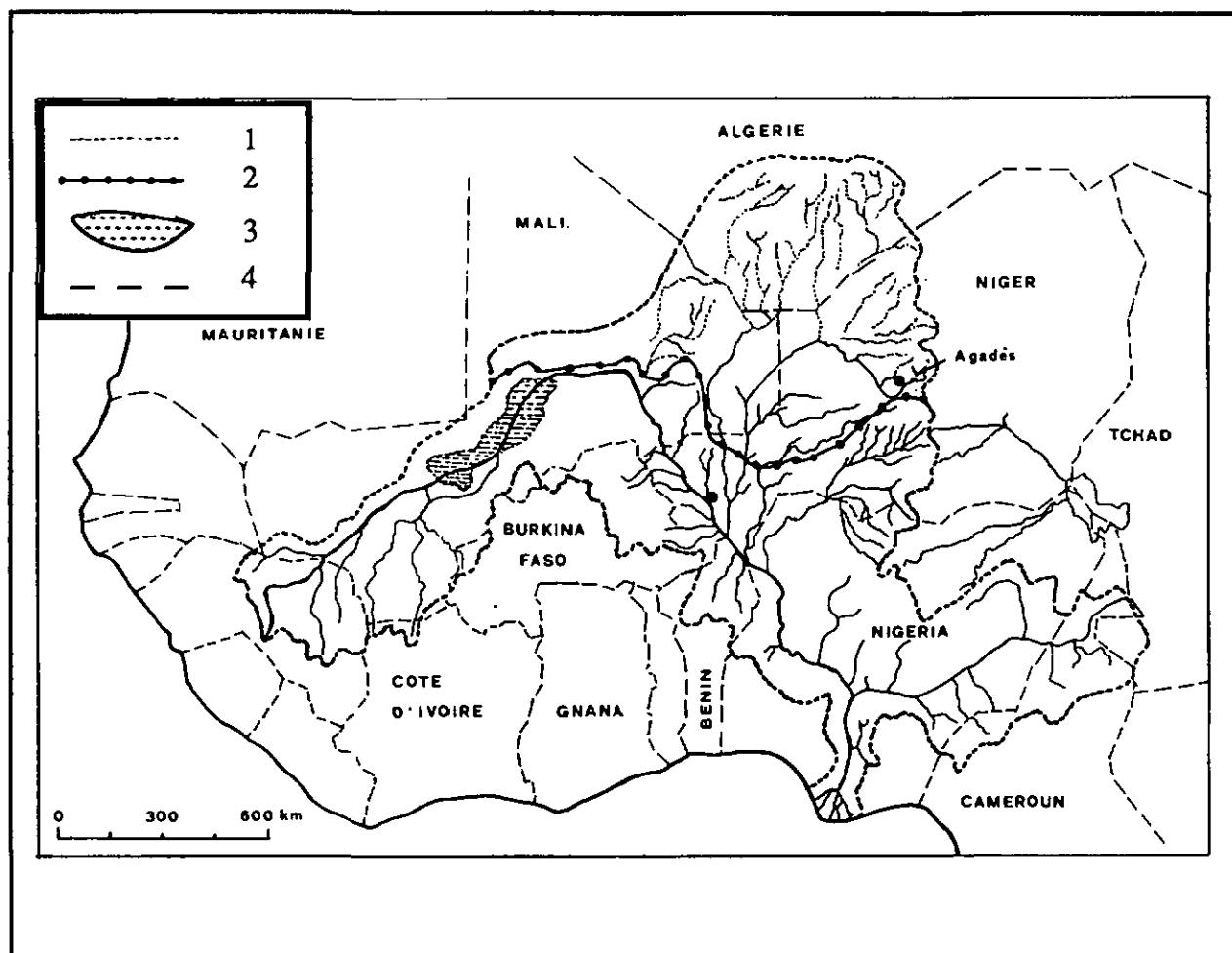


Figure 11 : Réseau hydrographique du fleuve Niger. 1 - Limite du bassin hydrographique du fleuve. 2 - Limite entre le réseau actif au sud et le réseau d'oueds au nord. 3 - Delta intérieur du fleuve. 4 - Frontière politique.

#### 2.5.4.7. PALEOHYDROLOGIE

Aux lieux où les réservoirs profonds sont captés par forage notamment au centre du bassin, les teneurs en isotopes tel que le  $^{14}\text{C}$  sont, dans la plupart des cas, sont très faibles ( $< 1\% \text{PMC}$ ) [Zuppi, 1980 ; Joseph, 1990 ; Fontes et al., 1992 ; Margat, 1992]. Les âges avancés (selon différents modèles de correction de l'Activité initiale  $A_0$ ) qualifient les eaux de ces réservoirs d'anciennes. Aussi, le Chlore 36, isotope radioactif dont les propriétés géochimiques en font un excellent traceur des solutions naturelles [Guendouz, 1985], est actuellement utilisé dans le sous-bassin de Tin Séririne-Irhazer pour l'étude des eaux "très anciennes" grâce à sa longue période de  $3.01 \times 10^5$  années [Fontes et al., 1992].

Le temps de séjour des eaux est lié au lent déplacement de ces eaux sur de grandes distances et aux aires d'alimentation périphériques (de ces réservoirs) qui débordaient davantage qu'actuellement [Margat, 1992]. En témoignent les sédiments paléolacustres déposés pendant des périodes plus humides (fig. 13) dans les lits d'oueds actuellement ensablés ("fossilisés") et dans les zones d'affleurement des réservoirs du Tin Séririne-Irhazer [Dodo & Fontes, en cours], ou dans la zone à nappe libre du Continental intercalaire dans la cuvette tchadienne [Gasse et al., 1990 ; Fontes & Gasse, 1990 ; Tehet et al., 1990].

Actuellement, des eaux des crues d'oueds issues des massifs participent à la recharge des réservoirs sur la bordure des sous-bassins de Tin Séririne - Irhazer. En effet, la présence du tritium (2.5 à 15.50 UT) a été enregistrée dans certains forages profonds qui captent l'aquifère du Groupe des grès d'Agadès ; ces forages sont situés à proximité de certaines vallées quaternaires d'oueds [Joseph, 1990].

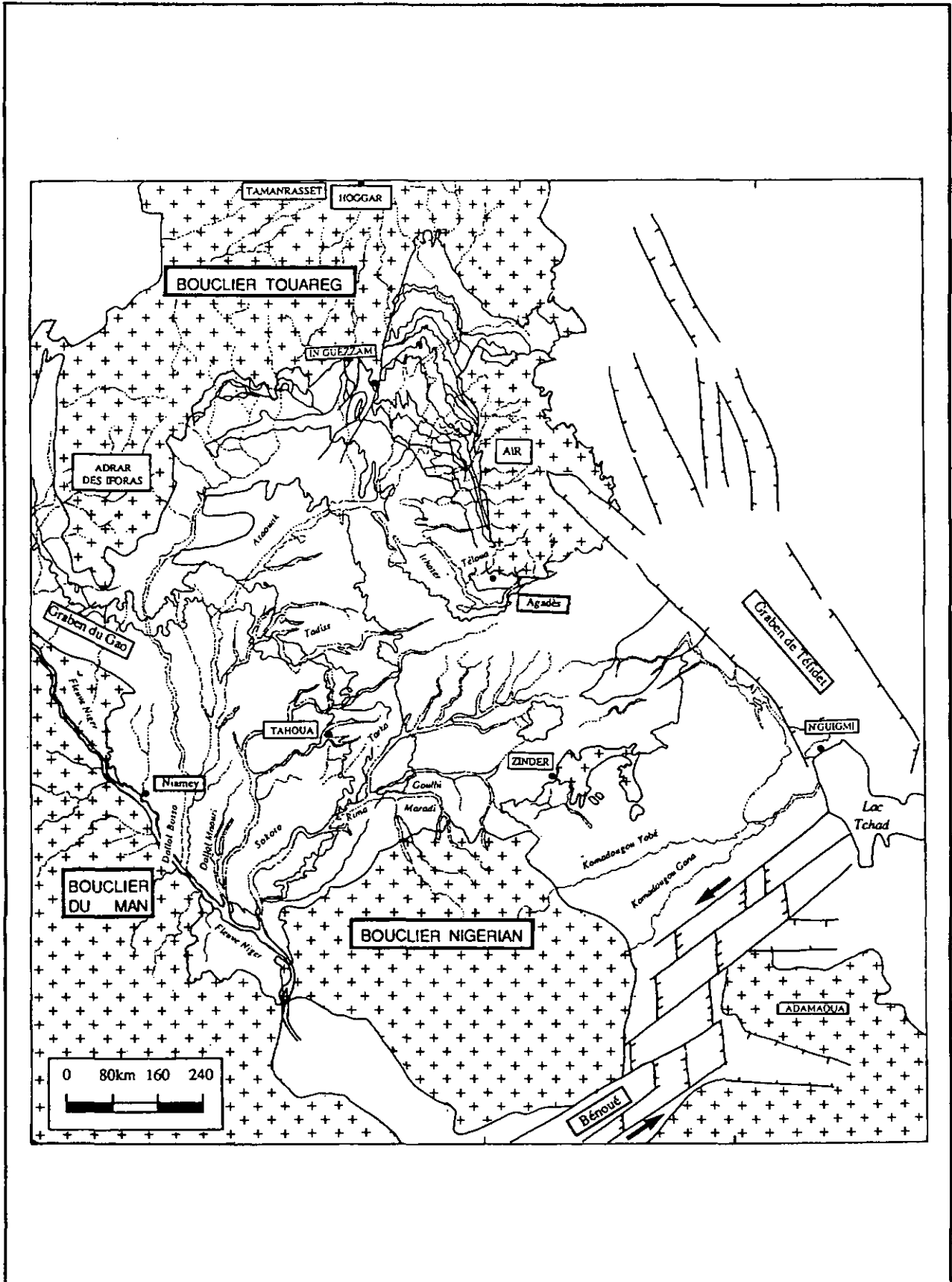


Figure 12 : Réseau hydrographique dans le bassin du Niger.

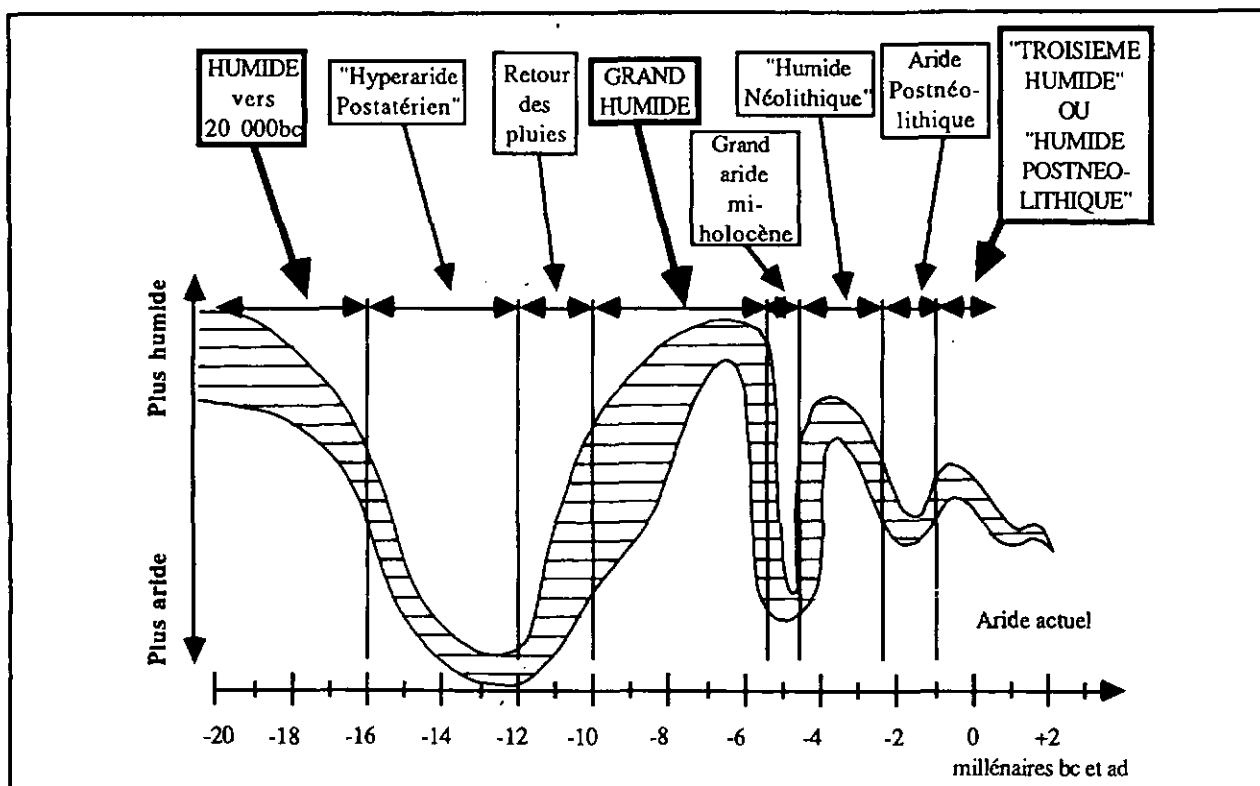


Figure 13 : Evolution des climats sahariens (Muzzolini, 1982, 1985).

# *Chapitre 3*

*Identification et Géométrie des  
Aquifères du Bassin du Niger*

## Chapitre 3

# Identification et Géométrie des Aquifères du Bassin du Niger

3.1. Collecte des données .....	28
3.2. Banque de données .....	30
3.2.1. Banque de données statiques.....	31
3.2.2. Banque de données dynamiques.....	31
3.3. Structure et géométrie du bassin.....	32
3.3.1. Analyse structurale dans le Tin Séririne-Irhazer .....	32
3.3.1.1. La flexure-faille d'In Azaoua-Arlit.....	32
3.3.1.2. Les flexure-failles N30 .....	34
3.3.1.3. Les failles N70 - 80.....	34
3.3.1.4. Les dorsales.....	35
3.3.2. Sous-bassin de Tin Séririne.....	36
3.3.2.1. Aquifère du Cambro-Ordovicien CO.....	36
3.3.2.2. Aquifère du Dévonien inférieur (DI).....	37
3.3.3. Sous-bassin de l'Irhazer .....	37
3.3.3.1. Aquifère du Viséen inférieur (Farrazékat = FZ).....	37
3.3.3.2. Aquitard du Namurien inférieur (Guezouman = Guez).....	38
3.3.3.3. Aquifère du Namurien supérieur (Tarat = TR).....	38
3.3.3.4. Aquitard du Permien (Izégouande = IZE).....	39
3.3.3.5. Aquifères du Trias - Jurassique (Groupe d'Agadès) .....	39
a - Mur du Trias.....	39
b - Mur du Mousseden.....	39
c - Mur du Jurassique inférieur .....	39
d - Mur d'Abinky.....	40
e - Aquifère Jurassique supérieur.....	41
3.3.3.6. Domaine central .....	41
3.3.3.7. Domaine méridional.....	42
3.3.3.8. Domaine Ouest flexure-faille d'In Azaoua-Arlit.....	42
3.3.3.9. Domaine Est flexure-faille d'In Azaoua-Arlit.....	42
3.3.3.10. Conclusion.....	42
3.3.4. Sous-bassin d'Iullemeden .....	42
3.3.4.1. Aquifère du Crétacé (Le Continental intercalaire ss : CI).....	42
a - Nature du réservoir .....	42

b - Structure et géométrie.....	43
3.3.4.2. Aquifères du Tertiaire (= Continental terminal CT).....	43
a - Aquifère du CT1 .....	43
b - Aquifère du CT2.....	43
c - Aquifère du CT3 .....	43
3.5. Conclusion .....	44

Ce chapitre est entièrement consacré, d'une part aux problèmes liés à l'élaboration d'une banque de données factuelles analytiques disponibles, et d'autre part, à la reconstitution de la géométrie du bassin du Niger.

Ce travail de reconstitution procèdera d'abord par le sous-bassin de Tin Séririne au nord, ensuite celui de l'Irhazer au centre et enfin par l'Iullemeden au sud.

### 3.1. Collecte des données

L'essentiel de ces données provient des compagnies et sociétés minières nationales et internationales. Leurs pôles d'intérêt privilégient la recherche et l'exploitation des ressources minérales (Pétrole, Uranium, Charbon, entre autres) au prix d'énormes sacrifices financiers. On comprendra aisément que de telles données relèvent purement du secret minier ; leur collecte nous a amené à rencontrer d'abord certains auteurs et essayer d'obtenir, à *titre personnel*, les informations susceptibles d'échapper aux rapports confidentiels. L'OACT/PCHIA a été confrontée également au problème de la collecte de documents africains concentrés en Europe (Londres, Paris, etc...), [Safar-Zitoun, 1992]. Nous allons présenter les étapes chronologiques des différentes campagnes de forages.

- Depuis 1957, date de la découverte du premier indice d'Uranium par le CEA, d'importantes campagnes d'exploration (géophysique auto et aéroportée, radioprospection aérienne, sondages) ont apporté une somme considérable de données qui ne sont malheureusement pas toutes du domaine public [Anon/COGEMA, 1970 ; 1972 ; 1973 ; 1977 ; 1978]. Les recherches se sont effectuées en deux phases : à grande échelle (maillage de 10 à 20km) sur tout l'Irhazer, à petite échelle (maillage de quelques dizaines à quelques centaines de mètres) dans les zones d'intérêt. Les données hydrogéologiques ont apporté des précisions sur les aquifères du Carbonifère et ceux du Continental intercalaire (sens large) dans les périmètres miniers d'Arlit, Afasto, Téchili, Imouraren, In Adrar. A ce jour, nous avons inventorié 500 forages dont 144 dans le périmètre d'Arlit (fig. 14).

- En 1962, La Compagnie d'Exploration Pétrolière CEP - Esso Minerals effectuait 10 forages profonds dans le synclinal de Tin Séririne. Chaque réservoir atteint a été testé *individuellement*. Les informations fournies se sont révélées précieuses pour la connaissance de la pression, la charge piézométrique et de la chimie des eaux des réservoirs profonds paléozoïques [Cornut, 1966].

- Le premier témoignage indiscutable d'une étude hydrogéologique réalisée dans l'ensemble Tin Séririne-Irhazer fut l'œuvre de Joulia en 1965 sur la base de 150 points d'eau dont 17 forages. La partie la plus importante de son rapport a été consacrée à la connaissance des aquifères du Continental intercalaire (sens large).

- 12 forages-pilotes exécutés en 1970 précisent l'extension de l'aquifère du "Groupe des grès d'Agadès" dans la partie méridionale et orientale du bassin.

- En 1971, 8 forages exécutés dans le centre de l'Irhazer apportent des précisions sur l'aire d'artésianisme.

TROISIEME PARTIE : Identification et Géométrie des Aquifères du Bassin du Niger

-En vue de déterminer les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères pour ses besoins en eau, la société japonaise IRSA a réalisé 10 forages en 1978 [IRSA, 1978] dans le périmètre minier de Teguida N'Tessoum.

- De 1978 à 1980, la fourniture d'eau en quantité et en qualité suffisantes pour le fonctionnement de la centrale thermique de la SONICHAR d'Anou Araren a nécessité la réalisation de 10 forages afin de préciser les caractéristiques hydrogéologiques d'un compartiment de l'aquifère fracturé du Groupe des grès d'Agadès [Bérard & Vandenbeusch, 1980].

- A la recherche des structures géologiques uranifères et charbonnières, la compagnie minière japonaise PNC exécuta, depuis 1978, 185 forages dans le périmètre de Sékiret. Les informations recueillies ont précisé, entre autres, les rôles géologiques de la flexure-faille subméridienne d'In Azaoua-Arlit et du décrochement dextre d'Azélik engendrant un graben. Ces données nous ont permis de préciser les limites méridionale et orientale de l'aquifère du Viséen inférieur.

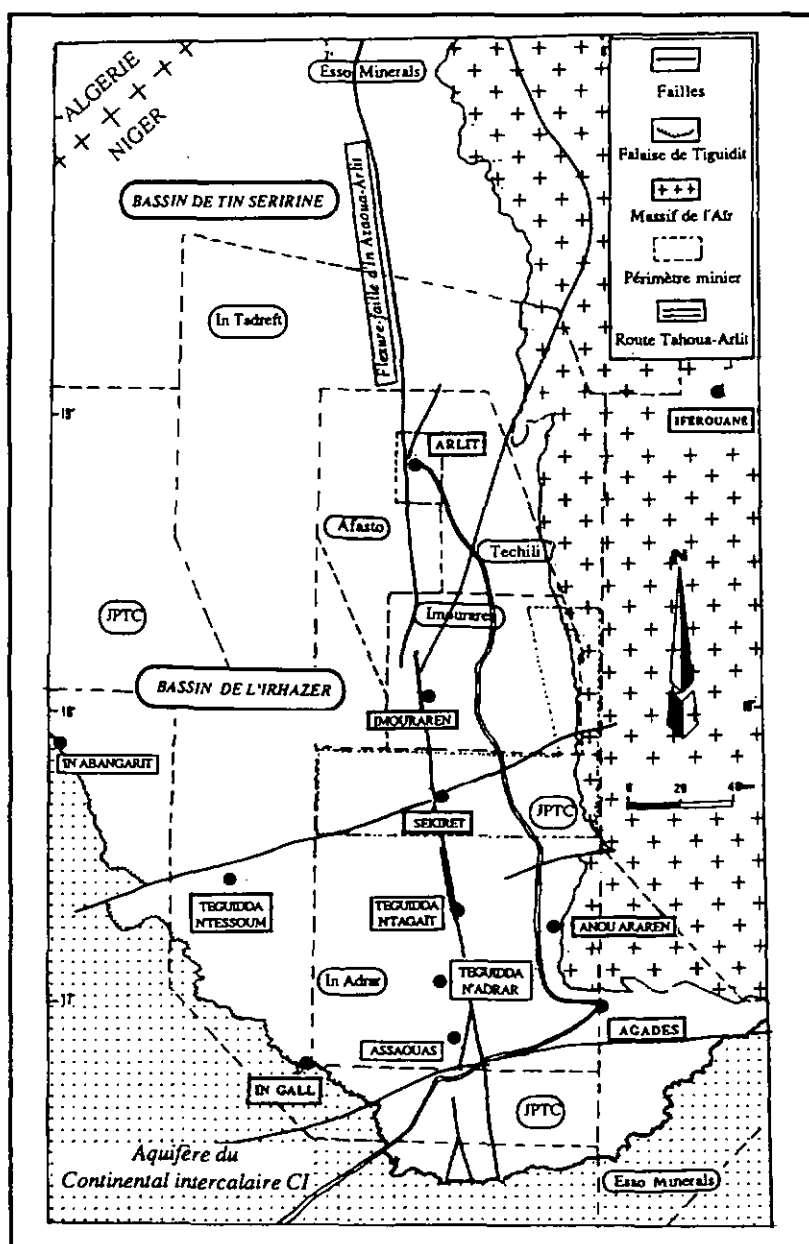


Figure14 : Périmètres miniers dans les sous-bassins du Tin Séririne et d'Irhazer.

- L'essai de définition des conditions aux limites hydrogéologiques occidentale et méridionale des aquifères du Groupe des grès d'Agadès nous a conduit à considérer 216 forages dont 3 pétroliers réalisés dans les aquifères du Continental intercalaire CI et du Continental Terminal CT d'Iullemeden.

- Les réservoirs quaternaires des vallées d'oueds, situés dans la bordure occidentale de l'Aïr, représentent les principales ressources utilisées pour les cultures maraîchères et pour l'alimentation en eau potable de certaines agglomérations (Agadès : 55'000hab). La recharge de ces réservoirs, sujette aux aléas climatiques, a favorisé un développement sans cesse croissant d'études hydrologiques réalisées par l'ORSTOM depuis 1960, et hydrogéologiques localisées [Yacouba, 1985 ; Dodo, 1986 ; Koroné, 1987 ; Armand, 1987 ; Balmer & al., 1987 ; Magnin, 1989 ; Cerveras, 1990 ; Zakara, 1990 ; Pitteloud, 1991 ; Gerbert, 1992]. Nous avons pu obtenir les dossiers de 208 forages.

- Après l'adhésion du Niger en 1980 à l'AIEA, de nombreuses études isotopiques ont été réalisées [Zuppi, 1980 ; Joseph & Aranyossy, 1985 ; Ousmane, 1987 ; Schroeter et al., 1987 ; Dodo, 1988 ; Gasse et al., 1990 ; Joseph, 1990 ; Andrews et al., 1992] afin de reconstituer le type de recharge des nappes profondes, et d'évaluer "l'âge" des eaux.

Dans la majorité des cas, chaque dossier de forage minier est composé de données topographiques, techniques, géologiques, géophysiques (annexe 2) ; quant au forage hydrogéologique, des informations sur le débit spécifique, la transmissivité, le coefficient d'emménagement (rarement), et enfin les résultats d'analyses chimiques d'éléments majeurs et la salinité (fréquemment), accompagnent le dossier.

Face à ces nombreuses données, une stratégie d'organisation et de gestion doit être adoptée. En effet, 1330 forages ont été ainsi inventoriés dont 1114 sont concentrés dans l'ensemble du Tin Séririne-Irhazer. La profondeur des ouvrages varie de la périphérie au centre du bassin du Niger respectivement de 40 à 3810m. Si nous considérons uniquement le réservoir du Cambro-Ordovicien, ceux du Groupe des grès d'Agadès et le Continental intercalaire CI (sens strict), nous obtenons les données consignées dans le tableau 4.

	Cambro-Ordovicien	Groupe d'Agadès	Cont. intercalaire CI
Nombre de forages	56	346 issus de 567	134
Profondeur min. (m)	20	30	40
Profondeur max. (m)	1132	1061	3810
Profondeur moy. (m)	223.07	359.973	358.58
Ecart-type	186	205.93	468.10
Nb de mètres linéaires	12491.90	124550.70	48050.33

Tableau 4 : Analyse statistique des forages dans les trois principaux aquifères du bassin du Niger.

### 3.2. Banque de données

C'est l'ossature sur laquelle repose tout le poids de notre travail. De la qualité de sa constitution dépend la qualité de son usage dans une des prochaines étapes de notre étude. C'est une étape fastidieuse mais indispensable [Bouzelboudjen, 1987].

Il nous paraît logique d'observer le principe de la stratigraphie et de la superposition des formations géologiques traversées par les forages, de manière à mieux refléter les données statiques (topographie, géologie, champ des paramètres physiques) et dynamiques (niveaux piézométriques, chimie).

La première étape a été entièrement consacrée à la vérification de la position et de l'altitude de chaque point d'eau sur les cartes topographiques aux de 1:2'00'000 en coordonnées Lambert. En dehors des zones d'intérêt minier où un nivellement précis a été réalisé (de l'ordre du centimètre), toutes les altitudes se basent sur le nivellement barométrique général.

### 3.2.1. Banque de données statiques

La cote du mur de chaque formation traversée par le forage a été calculée en vue d'élaborer ultérieurement des cartes d'isohypses du mur et du toit de celle-ci.

Les corrélations litho-stratigraphiques, appuyées par d'autres données statiques (cartes topographiques, géologiques), ont permis d'établir des coupes séries NS et EW dans le Tin Séririne-Irhazer de manière à approcher sa structure et sa géométrie.

### 3.2.2. Banque de données dynamiques

S'il est fort aisé de retrouver le niveau piézométrique dans tout dossier de forage, en revanche, le(s) réservoir(s) capté(s) n'est(ne sont) pas explicitement mentionné(s). Quelle signification devra-t-on accorder à cette mesure? ***La carrence de telles observations pertinentes limite singulièrement l'efficacité de toute étude hydrodynamique.***

Nous étions ainsi amenés à reconsidérer chaque forage selon l'âge et le nombre d'aquifères qu'il capte simultanément. Une première classification a consisté à regrouper les données piézométriques des forages qui captent un seul aquifère à la fois. Subséquemment, une seconde classification a rassemblé les forages qui captent deux ou plusieurs aquifères à la fois pour servir de comparaison.

Avant d'élaborer toute carte piézométrique, un état stationnaire de référence devra être judicieusement choisi sachant bien que les différentes campagnes de forages n'ont pas été menées pendant la même année. Il nous fallait dès lors considérer uniquement les forages *avant* l'exploitation du réservoir. La piézométrie pourrait servir par la suite, par exemple, à la calibration des modèles de gestion (§ 6ème partie).

Il nous a fallu enfin corriger les cotes piézométriques en fonction de la densité de l'eau de l'aquifère (des valeurs de 28g/l de salinité et de 63°C de température ont été relevées dans certains forages profonds), [Degallier, 1986], selon la formule :

$$H = \frac{P \times 10}{d} + Z_r - h$$

avec:

H : Potentiel hydraulique [m]

P : Pression de fond stabilisé [kg/cm<sup>2</sup>]

d : densité de l'eau

Z<sub>r</sub> : cote de la table de rotation [m]

h : cote de l'enregistreur par rapport à la table de rotation [m]

NB : en prenant d = 1, on obtient la hauteur pseudo-potentiométrique, équivalent en hauteur d'eau douce de la pression de couche.

Les tests individuels des réservoirs traversés par les forages pétroliers ont donné les valeurs de la perméabilité en millidarcy transformées en mètre/seconde selon l'expression :

$$K = k \frac{g}{m} = k \frac{r \times g}{m}$$

avec :

K = perméabilité hydraulique [m/s]

k = perméabilité intrinsèque du milieu poreux [millidarcy]

1 milli Darcy =  $10^{-3}$  Darcy

1 Darcy =  $0.987 \times 10^{-8}$  cm<sup>2</sup>

g = poids spécifique du fluide en écoulement [kg/m<sup>2</sup>.s<sup>2</sup>]

r = masse spécifique du fluide [kg/m<sup>3</sup>]

g = accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>]

m = viscosité dynamique du fluide à la température donnée [kg s/m<sup>2</sup>]

Les données sont saisies en Dbase III+, facilement adaptables au système d'Information Géographique SIGNER installé au Ministère nigérien chargé de l'Hydraulique et de l'Environnement à Niamey et opérationnel depuis 1990 [Bonnier et al, 1991]. Un extrait de cette banque de données est présenté en annexe 2.

Au terme de ce travail, les données issues des 1330 forages sélectivement classés ont permis d'approcher l'identification de 13 aquifères du bassin du Niger échelonnés du Cambrien au Quaternaire. Ainsi qu'il a déjà été souligné dans le premier chapitre, cette première approche est l'élaboration des coupes sériées (annexe 3) ainsi que des cartes d'isohypses du mur et du toit de chaque réservoir (annexes 4 à 9) dans le but de reconstituer la géométrie du bassin.

Les numéros correspondent au rang attribué aux forages et renvoient à la banque des données. D'autre part, les traits pleins correspondent à la profondeur réelle du forage ; en revanche, les traits discontinus qui prolongent la profondeur du forage sont le résultat des différentes corrélations entre ces coupes.

Rappelons que le sous-bassin de l'Irhazer est le point de départ de notre travail. Il est affecté par 1058 forages soit plus de 80% de l'ensemble des points d'eau inventoriés. Irhazer et Tin Séririne regroupent plus de 85% du total des forages. Aussi attarderons-nous dans l'ensemble Tin Séririne-Irhazer.

### 3.3. Structure et géométrie du bassin

#### 3.3.1. Analyse structurale dans le Tin Séririne-Irhazer

A la recherche des corps minéralisés, les études minières ont apporté des précisions sur la tectonique régionale (fig. 15), en particulier les accidents qui représentent un intérêt certain en raison de leurs rôles métalotectiques [Hirlemann & Robert, 1980 ; Forbes, 1989]. Cette analyse ne prétend pas se substituer aux études structurales déjà réalisées mais de dresser un inventaire des principaux éléments structuraux qui affectent les réservoirs aquifères et/ou le socle à la lumière des coupes sériées nord-sud et est-ouest établies sur la base de notre banque de données (annexe 3).

##### 3.3.1.1. LA FLEXURE-FAILLE D'IN AZAOUA-ARLIT

C'est l'élément tectonique majeur. Il s'agit d'un décrochement senestre qui traverse et partage l'ensemble Tin Séririne-Irhazer en deux domaines (ouest et est) en suivant une direction NNW-SSE à subméridienne. Il présente un rejet et un comportement très variables : au sud, le compartiment est s'est affaissé de 100m environ (fig. 16) ; plus au nord, le rejet est nul dans le périmètre minier d'Imouraren (fig. 14) et s'inverse vers le périmètre d'Arlit ; c'est le compartiment ouest qui s'affaisse d'au moins 200m (fig. 17b).

TROISIEME PARTIE : Identification et Géométrie des Aquifères du Bassin du Niger

Cette disposition sera conservée dans le sous-bassin de Tin Sérine plus au nord avec cependant un rejet très faible. L'accident se prolonge dans le massif cristallin du Hoggar.

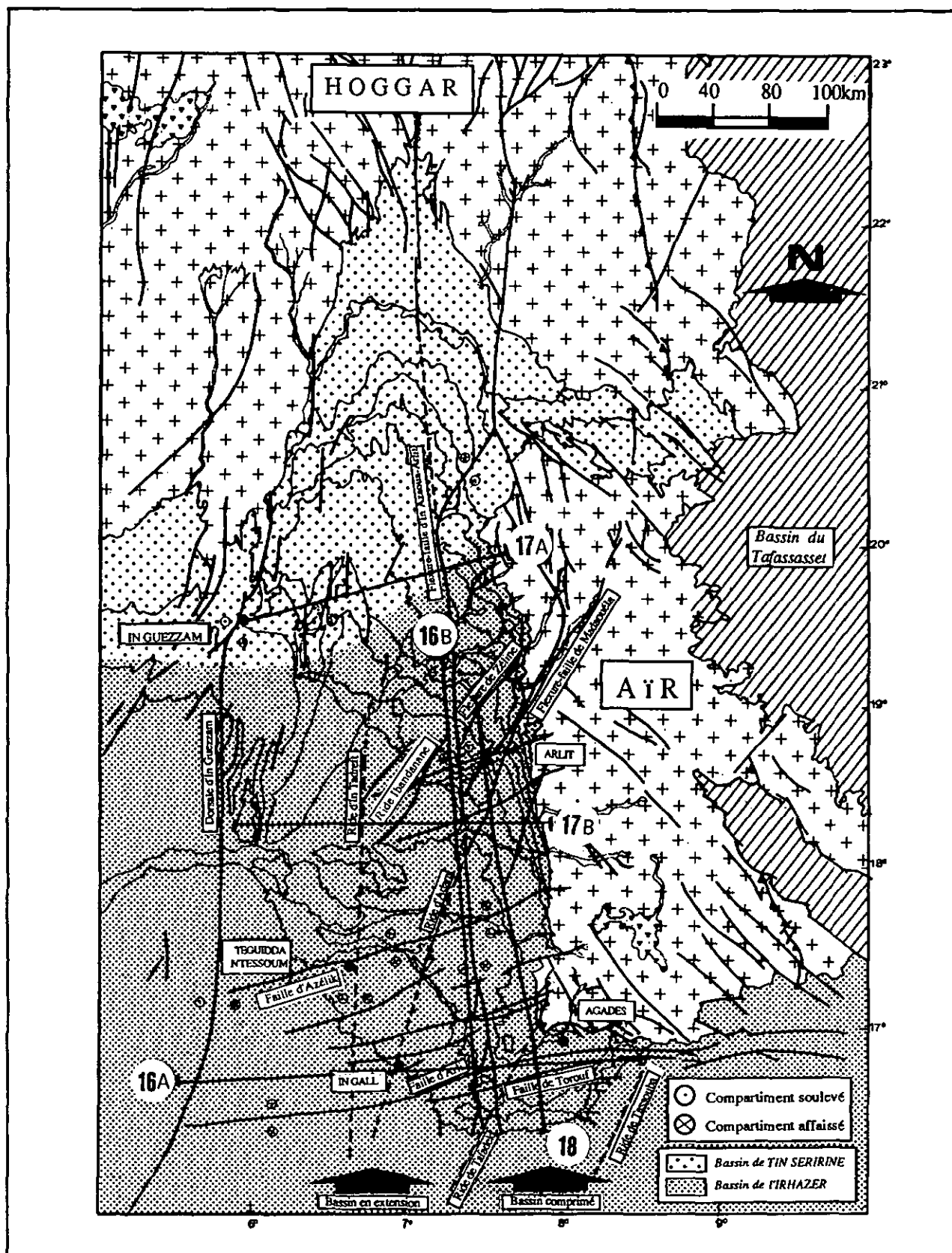


Figure 15 : Structure du sous-bassin de Tin Sérine-Irhazer (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM, Nol-2, 1992).

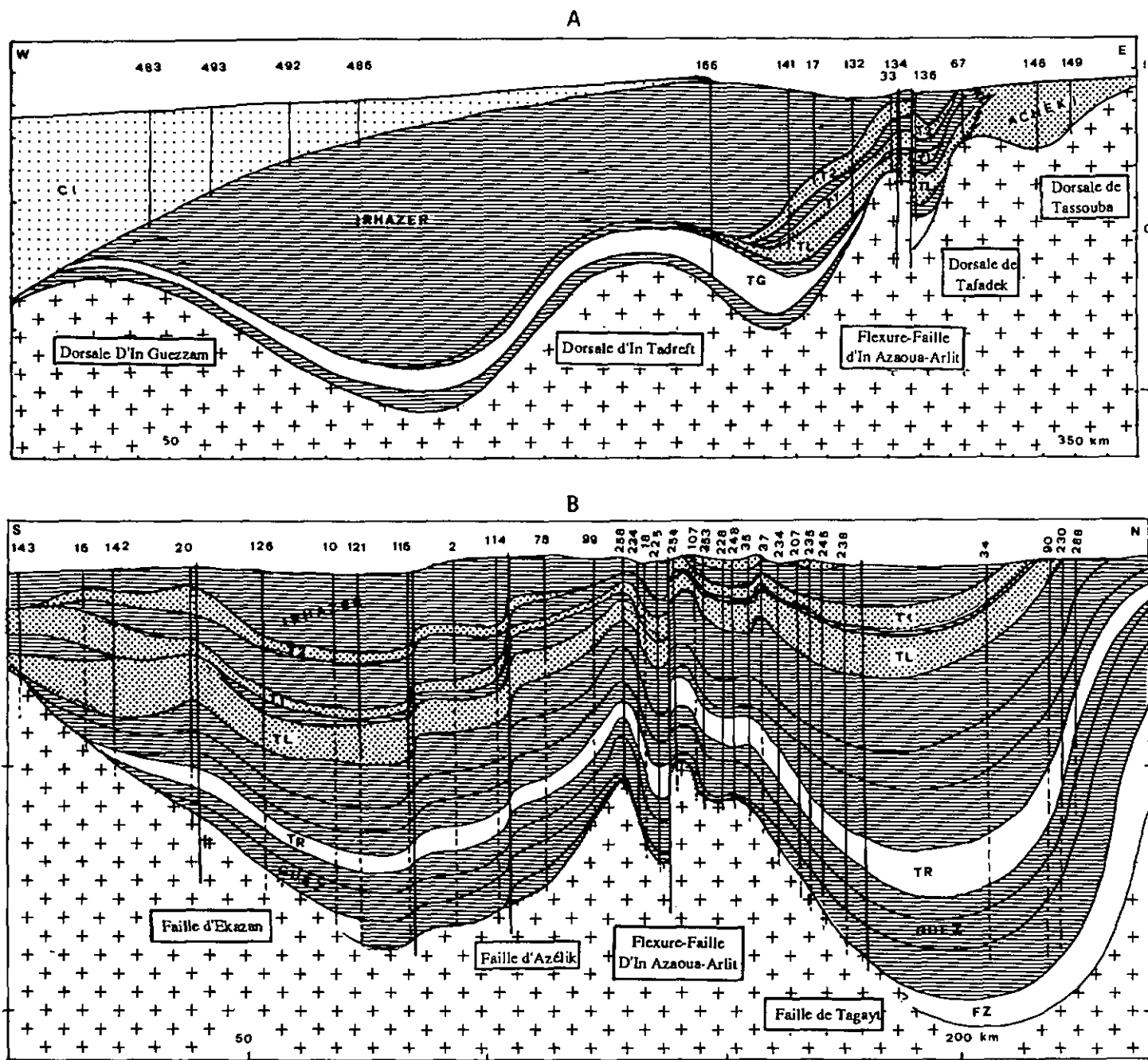


Figure 16 : A. - Coupe transversale dans la partie méridionale de l'Irhazer. B. - Coupe longitudinale dans le domaine Ouest-flexure de l'Irhazer.

### 3.3.1.2. LES FLEXURE-FAILLES N30

Elles jouent en décrochement senestre (Adrar Emoles, Madaouéla, Izéretagen, Mouron, Autriche, Zéline) ; leur rejet peut atteindre 500m. Elles affectent surtout les formations dans le périmètre minier d'Arlit (fig. 18). La flexure-faille de Madaouéla a joué le rôle de limite sédimentologique de l'aquifère du Jurassique supérieur. Ces flexures rejouent verticalement et donnent naissance à des compartiments soulevés et affaissés les uns par rapport aux autres.

### 3.3.1.3. LES FAILLES N70 - 80

Ce sont des décrochements dextres (fig. 18) à rejet vertical variable (In Adrar, Fagoschia, Réouchite, Anou Makkaren, Ogba, le faisceau Tagayts-Capucines). Si on considère l'accident d'Azélik dans le dôme

permien d'Azélik dans la région de Tegguidda N'Tessoum (annexe 3), le compartiment sud s'est affaissé d'au moins 200m ; le rejet diminue à proximité de cette flexure-faille d'In Azaoua-Arlit (fig. 15) et s'inverse à l'est de la flexure-faille.

Les failles d'Arlit et de Torouf, orientées EW, appartiennent au linéament guino-nubien (fig. 18). Elles découpent verticalement la bordure méridionale du sous-bassin de l'Irhazer en "marches d'escalier" affaissées vers le sud. Le rejet est d'au moins 50m.

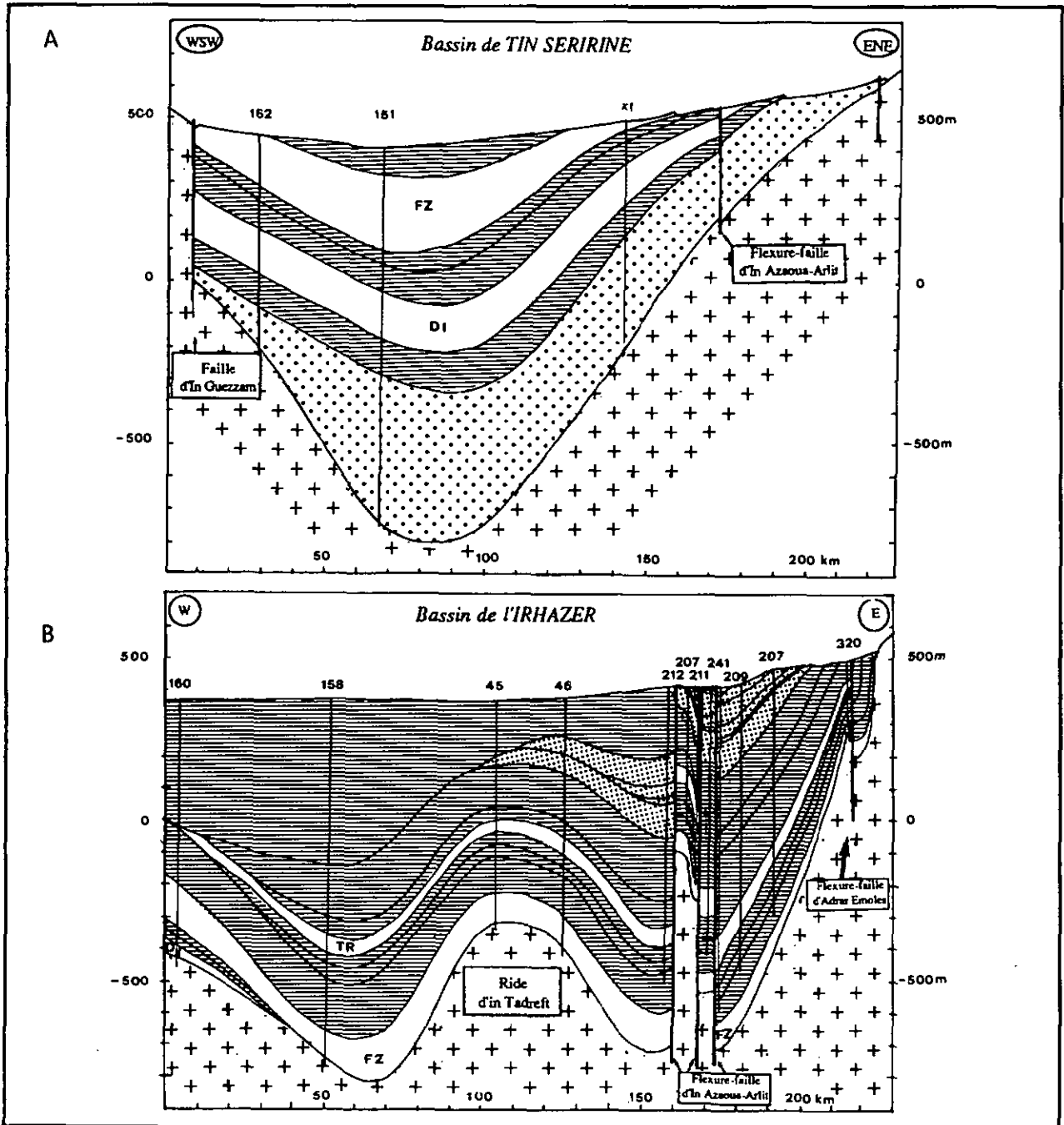


Figure 17 : Coupes transversales dans la partie centrale de Tin Séririne (A) et de l'Irhazer (B).

### 3.3.1.4. LES DORSALES

La dorsale d'In Guezzam représente la limite sédimentologique des formations permieniennes (fig. 15, 16) et namuriennes dans une moindre mesure. La dorsale d'In Tadref a limité le dépôt de l'aquifère du Trias. La

dorsale d'In Adrar, prolongement SW de la flexure-faille de Madaouéla, a limité les dépôts du réservoir du Jurassique supérieur. La dorsale de Tafadek a joué un rôle prédominant (fig. 18) ; elle isole les sédiments grossiers du faciès "Acheki" du reste des formations du Groupe des grès d'Agadès de l'Irhazer à l'ouest. La dorsale de Tassouba représente la limite sédimentologique orientale du Groupe des grès d'Agadès.

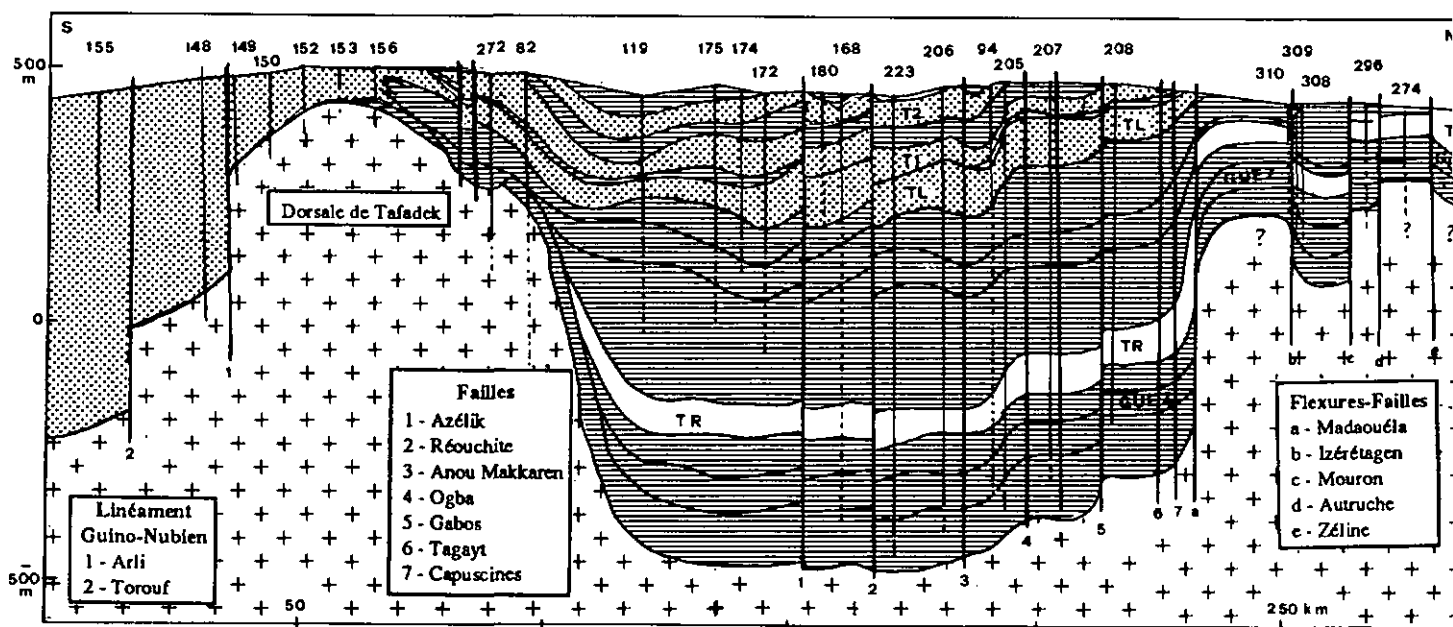


Figure 18 : Coupe longitudinale dans le domaine Est-flexure de l'Irhazer.

La prochaine étape pour la reconstitution de la géométrie du bassin du Niger est l'élaboration des cartes d'isohypses du mur et du toit de chaque réservoir (du Cambrien au Quaternaire) préalablement placé dans son contexte régional du grand bassin du Niger (annexe 4).

### 3.3.2. Sous-bassin de Tin Séririne

La coupe suit approximativement le tracé de la frontière entre l'Algérie et le Niger (fig. 15). Les formations sédimentaires (Cambrien-Carbonifère) épaisses de plus de 1000m, s'adosent à l'ouest sur le Hoggar et à l'est sur l'Aïr (fig. 17). Elles sont affectées par la flexure-faille d'In Azaoua-Arlit (dont le rejet est faible) et la faille d'In Guezam de rejet d'au moins 500m. Les formations prennent une disposition de graben-synclinal.

#### 3.3.2.1. AQUIFERE DU CAMBRO-ORDOVIEN CO

Il affleure au sud du Hoggar, à l'est de l'Adrar des Iforas et au nord de l'Aïr (fig. 5). L'aquifère est constitué de grès très grossiers à micro-conglomératiques. Le substratum est représenté par le socle. Son extension souterraine méridionale n'est connue que dans le Tin Séririne où sont concentrés les 56 forages qui captent l'aquifère. Il n'existe pas de forage au centre du Tin Séririne ni dans la partie à l'est de l'accident subméridien. Tout tracé non circonscrit dans les zones dépourvues de forage est interprété.

Il est affecté par les failles subméridiennes d'In Guezam à l'ouest et d'In Azaoua-Arlit à l'est (fig. 19). Le substratum montre nettement deux cuvettes l'une au nord, l'autre au sud plus développée (-750m d'altitude). La morphologie du toit de l'aquifère est identique à celle du substratum avec cependant une atténuation de la dépression septentrionale. L'épaisseur de l'aquifère varie de 100m au nord à 500m au centre de la cuvette du sud.

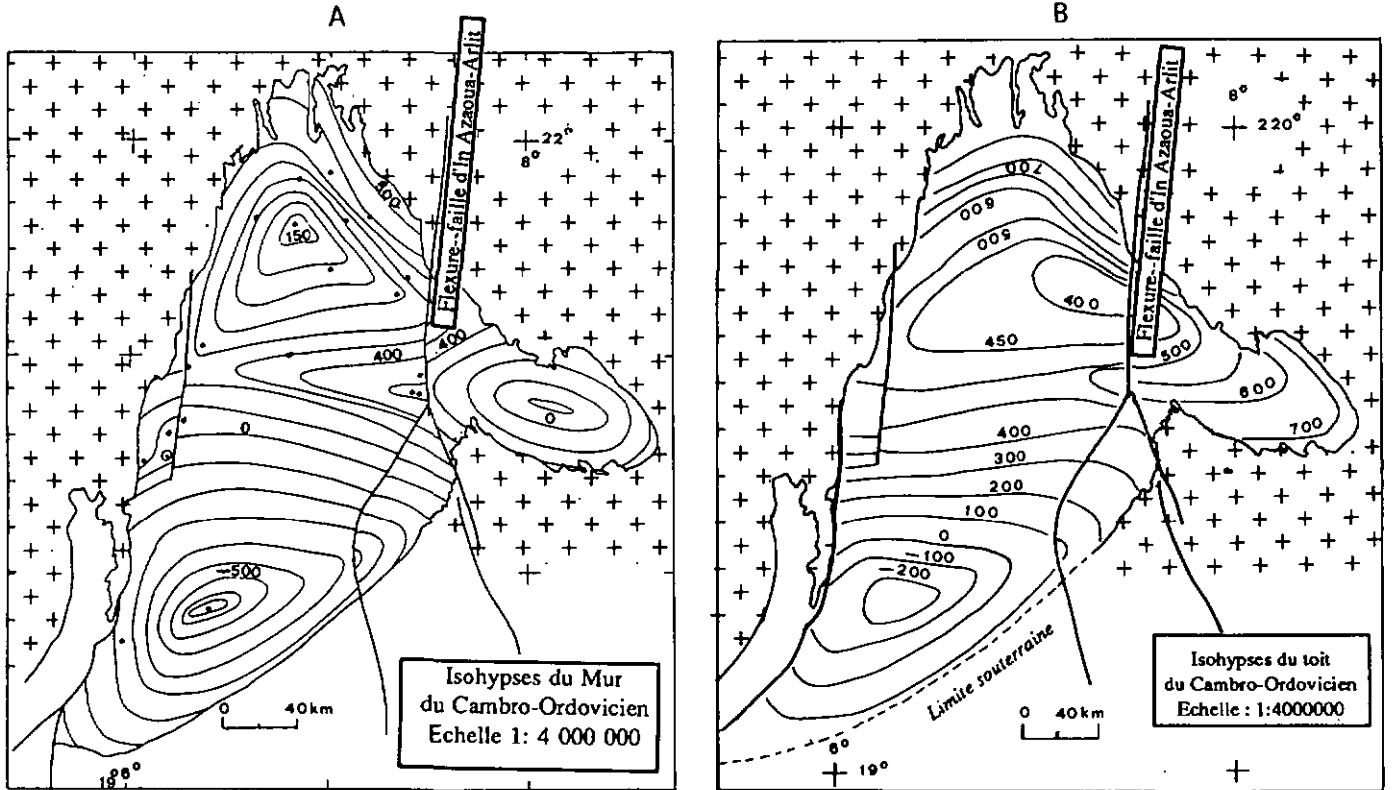


Figure 19 : Isohyets du mur (A) et du toit (B) du Cambro-Ordovicien.

### 3.3.2.2. AQUIFERE DU DEVONIEN INFÉRIEUR (DI)

Il affleure surtout dans le bassin de Tin Séririne et au pied des massifs du bouclier Touareg (fig. 5). Il est constitué des grès conglomératiques à la base, fins à grossiers au sommet. Son extension méridionale souterraine est connue uniquement dans le bassin de Tin Séririne-Irhazer à l'aide aux forages pétroliers ayant atteint le socle. Les seules données disponibles sont réparties dans l'ensemble Tin Séririne-Irhazer. Les courbes d'isohyets du mur et du toit à l'est de la faille NS ont été tracées sur la base des données structurales relatives à cet accident.

Il est affecté par la flexure-faille d'In Azaoua-Arlit à l'est et la dorsale d'In Guezzam à l'ouest (fig. 20). Son substratum est constitué des schistes gothlandiens. Le tracé des isohyets montre une disposition synclinale du réservoir d'axe NE-SW. L'allure des isohyets du toit est semblable à celle du mur. L'épaisseur moyenne de l'aquifère est de 100m ; plus au sud, l'épaisseur est réduite.

En conclusion, le sous-bassin de Tin Séririne, comblé par plus de 1000 mètres de formations sédimentaires (Cambrien-Carbonifère inférieur) occupe une disposition en graben-synclinal (fig. 17a).

### 3.3.3. Sous-bassin de l'Irhazer

#### 3.3.3.1. AQUIFERE DU VISEEN INFÉRIEUR (FARRAZEKAT = FZ)

C'est l'aquifère de la série de Térada. Le réservoir est constitué de grès grossiers. Il affleure dans le centre du Tin Séririne-Irhazer au nord, au pied de l'Aïr à l'est et du Hoggar au sud (fig. 5). Son extension méridionale souterraine est connue uniquement dans l'ensemble Tin Séririne-Irhazer sur la base des forages profonds (annexe 4). Au-delà (à l'ouest de la dorsale d'In Guezzam), son extension est inconnue.

Il est affecté par la dorsale d'In Guezzam à l'ouest, les flexures-failles NS et N30 à l'est du bassin et la

faille N80 en décrochement dextre d'Azélik. Celle-ci réduit considérablement l'épaisseur du réservoir. L'aquifère est à nouveau développé dans la partie méridionale de l'Irhazer où il fait corps avec le réservoir du Trias. Les isohypses du mur et du toit aquifère occupent une disposition en synclinal d'axe approximatif nord-sud avec l'existence d'une cuvette dans sa partie centrale. Une structure anticlinale d'axe NE-SW marque la dorsale d'Ibandanane.

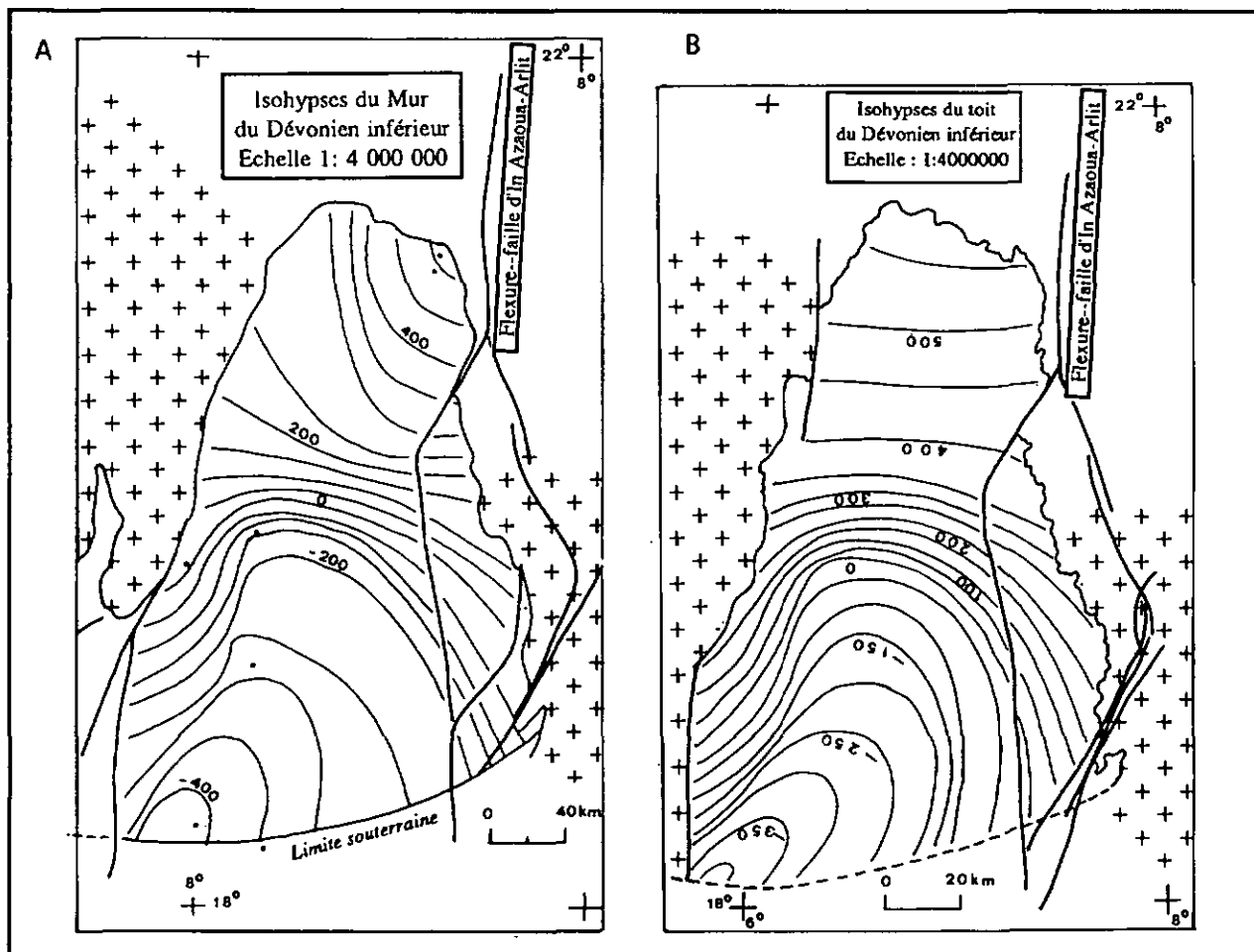


Figure 20 : Isohypses du mur (A) et du toit (B) du Dévonien inférieur.

### 3.3.3.2. AQUITARD DU NAMURIEN INFÉRIEUR (GUEZOUAN = GUEZ)

La série du Tagora repose sur les argiles franches marines viséennes (Talak) dont la puissance peut atteindre 200m au centre du bassin. Elle est composée de l'aquitard du Namurien inférieur et de l'aquifère du Namurien supérieur (Tarat) principal réservoir.

Le Guézouman affleure dans le centre du bassin de l'Irhazer et au pied des massifs du Hoggar de l'Aïr. Il n'est connu que dans le périmètre minier d'Arlit (annexe 5) où il est capté par 45 forages. Il ne saurait donc être représentatif à l'échelle de l'Irhazer.

Le Namurien inférieur débute par un conglomérat de base (le Téléflak) surmonté de grès moyens hétérogènes à passées fines et grossières qui se terminent par des grès fins à très fins et à passées d'argiles silteuses.

### 3.3.3.3. AQUIFÈRE DU NAMURIEN SUPÉRIEUR (TARAT = TR)

La formation affleure au centre de l'Irhazer et au pied des massifs du Hoggar et de l'Aïr. Le réservoir est

constitué de grès hétérogènes fins à grossiers à quelques passées argileuses. Les forages pétroliers réalisés à l'extrémité ouest du bassin ont mis en évidence une réduction considérable de la formation (11m d'épaisseur) dûe à la dorsale d'In Guezzam. En dépit de cela, sa limite souterraine occidentale n'est pas clairement définie.

L'aquifère est affecté par la dorsale d'In Guezzam à l'ouest, les flexures-failles NS et N30, la faille décrochante N80, et au sud le linéament EW guino-nubien (annexe 5). Les isohypses du mur et du toit mettent en évidence, à l'est de la flexure-faille d'In Azaoua-Arlit, l'existence d'un bassin racourci s'approfondissant de plus en plus d'est en ouest ; en revanche, à l'ouest de cet accident, l'aquifère occupe une disposition synclinale d'axe NS, affectée par le décrochement N80. Son épaisseur est en moyenne de 60m sauf dans l'axe du synclinal où elle peut atteindre 200m.

#### 3.3.3.4. AQUITARD DU PERMIEN (IZEGQUANDE = IZE)

Il est compris entre l'Aïr et la dorsale d'In Guezzam. Il affleure au nord et à l'est dans le sous-bassin de l'Irhazer. Il s'étend à l'ouest jusqu'à la dorsale d'In Guezzam où il se biseaute. Dans le centre du bassin, (région de Teguidda N'Tessoum), il apparaît en dôme hérité des mouvements conjugués de la dorsale d'In Tadreft et du décrochement dextre N80 d'Azélik. Il déborde, dans la partie méridionale de l'Irhazer, le linéament guino-nubien.

Le réservoir est constitué de grès grossiers arkosiques à ciment argileux et calciteux. Il repose sur d'épaisses formations (jusqu'à 300m) argilo-gréseuses viséennes de Madaouéla-Arlit. Il a surtout été étudié dans les périmètres miniers d'Arlit et de Teguidda N'Tessoum.

#### 3.3.3.5. AQUIFERES DU TRIAS - JURASSIQUE (GROUPE D'AGADES)

Il regroupe trois aquifères du Trias (Téloua 1, 2, 3), du Jurassique inférieur (Tchirozérine I) et du Jurassique Supérieur (Tchirozérine II) séparés entre eux par des argiles d'origine volcanique (les Analcimolites). Ils sont surmontés par les argiles franches crétacées (argilites de l'Irhazer) dont l'épaisseur peut atteindre, par endroits, 500m.

Le Groupe des grès d'Agadès est traversé tout ou en partie par 567 forages répartis selon des mailles de 20, 10km voire de quelques centaines de mètres dans les périmètres miniers. Cet ensemble n'a pas dépassé la dorsale d'In Tadreft à l'ouest (fig. 21).

##### *a - Mur du Trias*

Il est constitué de grès grossiers se terminant au sommet par des grès fins à analcimolites. Sa structure est complexe (fig. 21). En général, les isohypses présentent un gradient élevé est-ouest entre l'Aïr et la flexure-faille d'In Azaoua-Arlit ; à l'ouest de cet accident, le module d'espacement des isohypses croît d'est vers l'ouest. On note également les dômes observés sur la coupe N-S (fig. 16). Le Trias confirme bien l'existence de deux bassins disposés en synclinal d'axe NS de part et d'autre de l'accident NS. Son épaisseur à l'est de l'accident peut atteindre 100m ; elle est de 400m à l'ouest de la faille, dans la partie méridionale de l'Irhazer où il fait corps avec le Viséen inférieur. Sa limite sud est inconnue.

##### *b - Mur du Mousseden*

C'est la formation analcimolitique qui sépare les réservoirs du Trias et du Jurassique inférieur. Elle recouvre partiellement le Trias (fig. 22) ; en effet, par endroits, elle est absente (zones hachurées).

##### *c - Mur du Jurassique inférieur*

Le réservoir du Jurassique inférieur est constitué de grès fins à moyens à ciment analcimolitique. Il recouvre entièrement les argiles du Mousseden (annexe 6) et déborde vers l'ouest où il repose directement

sur le réservoir du Trias. Les isohypses montrent un gradient élevé à l'est de l'accident, faible à l'ouest.

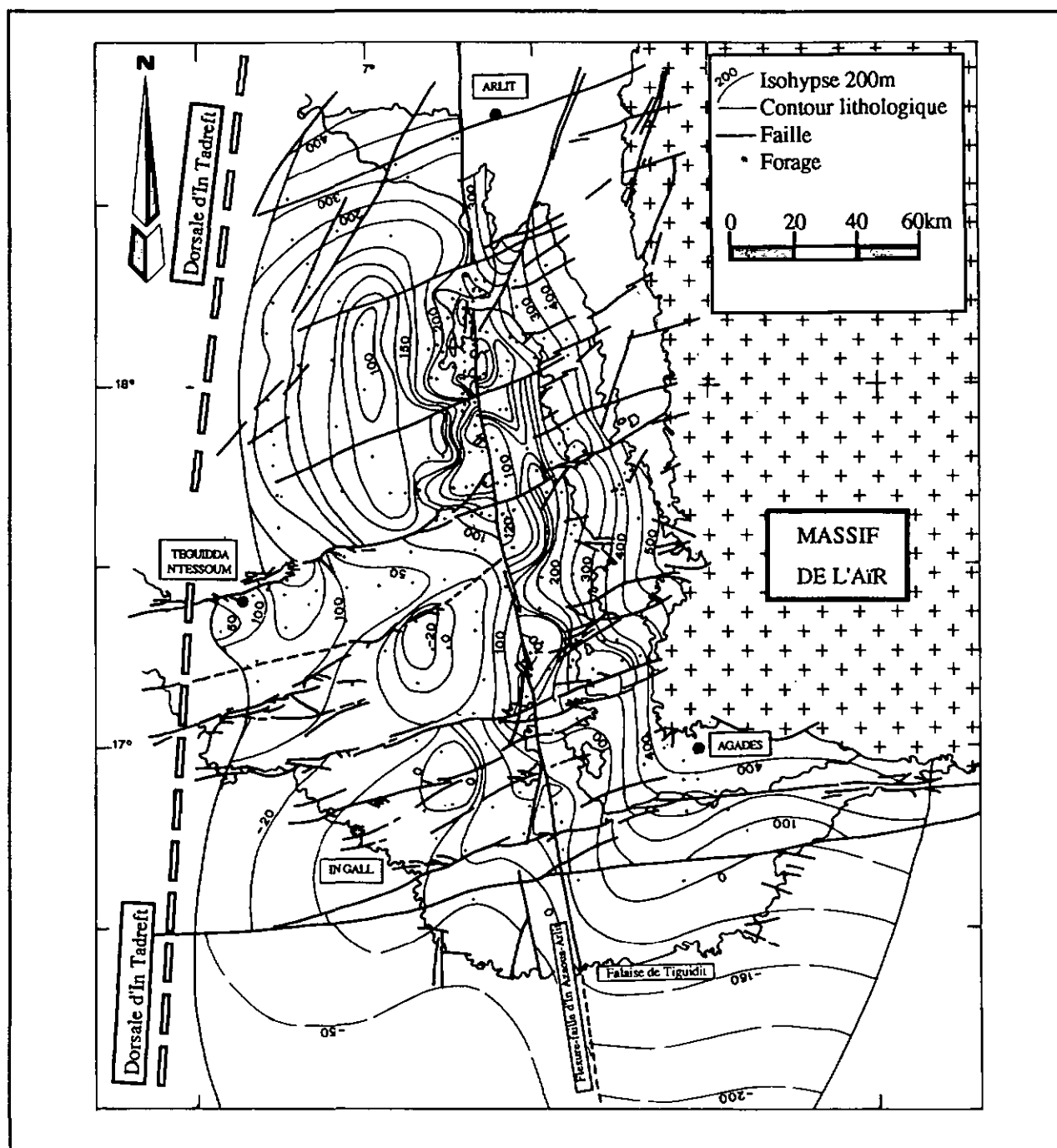


Figure 21 : Isohypses du mur du Trias (Téloua I II III).

d - Mur d'Abinky

C'est la seconde formation analcimolitique. Elle recouvre parfaitement les trois formations citées ci-dessus (annexe 6). Elle confirme l'existence des deux sous-bassins de part et d'autre de la flexure-faille.

**En conclusion**, les discontinuités sédimentologiques observées dans la formation du Mouseden témoignent en faveur de la communication hydraulique entre les aquifères du Trias et du Jurassique inférieur. Ils forment ainsi un seul réservoir. Le substratum est constitué d'argiles permienes (Moradi-Téjja-Tamamaït) et le toit d'argiles d'Abinky.

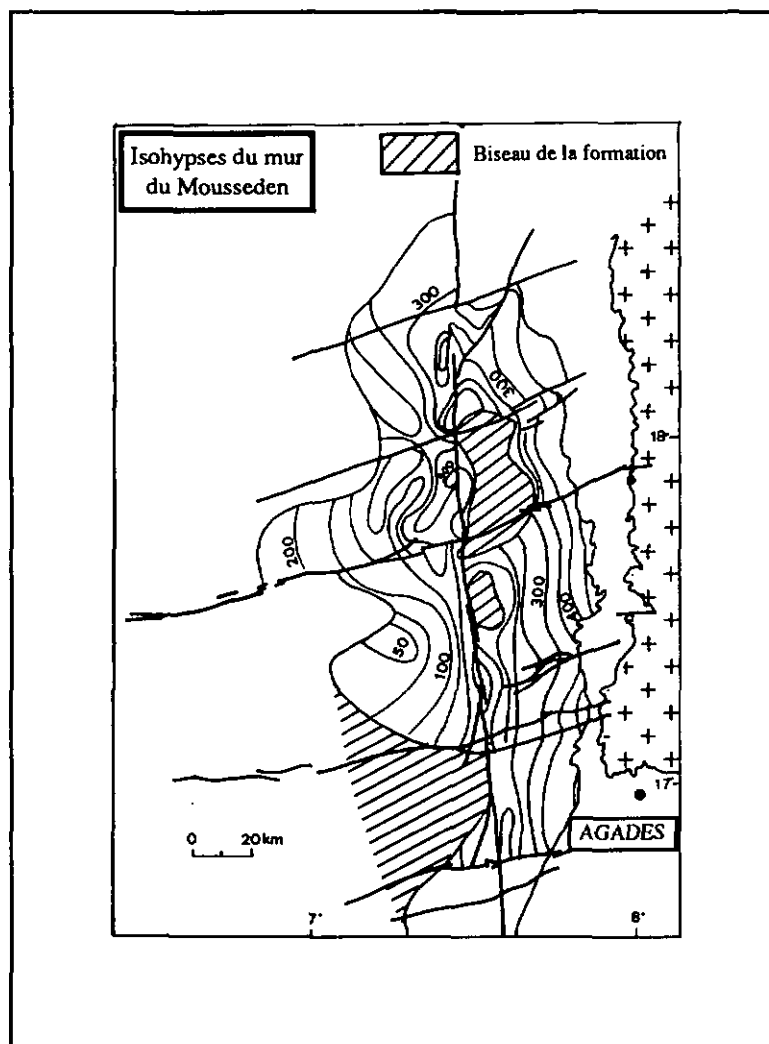


Figure 22 : Isohypes du mur du Mouseden.

e - Aquifère du Jurassique supérieur

Il affleure dans sa partie orientale et par endroits le long de la flexure-faille NS dont son compartiment occidental est soulevé d'environ 200m au nord et au sud du bassin (annexe 6). Il est constitué d'une alternance de grès moyens et d'analcimolites.

Le module d'espacement des isohypes est décroissant d'est vers l'accident subméridien. A l'ouest de celui-ci, l'espacement des isohypes est plus lâche ; celles-ci décrivent de petites cuvettes allongées dans la direction NS. Cette morphologie est confirmée par les isohypes du toit constitué des argiles franches de l'Irhazer. Le réservoir se présente également comme un ensemble de deux bassins en disposition synclinale d'axe NS de part et d'autre de l'accident, l'un raccourci à l'est, l'autre en extension à l'ouest. Les épaisseurs moyennes respectives sont de 50 et 70m.

A la lumière des cartes structurales et des coupes, nous subdivisons le sous bassin de l'Irhazer en plusieurs domaines.

### 3.3.3.6. DOMAINE CENTRAL

L'Irhazer est comblé sur plus de 1000m par les formations viséennes à la base et jurassiques crétacées au sommet (fig. 17b) Celles-ci sont affectées par les flexures-failles d'In Azaoua-Arlit et d'Adrar Emoles.

Plus à l'ouest, la remontée du socle (dorsale d'In Tadref) et l'amorce de la dorsale d'In Guezzam ont tendance à amincir, voire biseauter certaines formations. Entre ces deux dorsales se développe un synclinal d'axe NS. Entre la flexure-faille d'In Azaoua-Arlit et le massif de l'Aïr à l'est, les formations sont raccourcies ; en revanche, à l'ouest de cette flexure-faille, elles sont allongées.

#### 3.3.3.7. DOMAINE MERIDIONAL

Il est comblé par plus de 1000m environ de sédiments (Viséen - Crétacé inférieur), (fig. 16a). De part et d'autre de la flexure-faille d'In Azaoua-Arlit, les formations sont affectées par des dorsales entre lesquelles se développent des synclinaux d'axe NS. D'autre part, à l'est de cette flexure-faille, les formations sont raccourcies ; elles sont nettement plus allongées à l'ouest.

#### 3.3.3.8. DOMAINE OUEST FLEXURE-FAILLE D'IN AZAOUA-ARLIT

Les formations sédimentaires s'échelonnent du Viséen au Crétacé (fig. 16b) et comblent sur plus de 1000m deux sous-bassins (dont celui septentrional est bien développé) engendrés par la remontée du socle au droit du périmètre minier d'Imouraren (fig. 14). La présence de la flexure-faille d'In Azaoua-Arlit confirme son décalage en décrochement dextre mis en évidence dans l'analyse structurale [Hirlemann & Robert, 1980]. La partie méridionale de la coupe montre l'amorce de la dorsale de Tafadek.

#### 3.3.3.9. DOMAINE EST FLEXURE-FAILLE D'IN AZAOUA-ARLIT

Il est affecté (fig. 18), du sud au nord, par les failles EW de Torouf et d'Arlit, la dorsale de Tafadek N30, les décrochements dextres N70 à N80 et les flexures-failles en décrochement senestre N30. Entre la dorsale de Tafadek et la flexure-faille de Madaouéla se développe un bassin profond de plus de 1000m.

#### 3.3.3.10. CONCLUSION

L'ensemble des deux sous-bassins Tin Séririne-Irhazer se présente en une zone subsidente encadrée par deux horsts, l'un affleurant à l'est l'Aïr, l'autre jouant le rôle de haut-fond à l'ouest la dorsale d'In Guezzam (fig. 15). Cet ensemble subsident débute par le graben-synclinal de Tin Séririne au nord et évolue vers le sud par l'Irhazer. Celui-ci est composé de deux petits sous-bassins structuraux : un bassin comprimé à l'est de la flexure-faille d'In Azaoua-Arlit et un bassin allongé à l'ouest de cet accident.

### 3.3.4. Sous-bassin d'Iullemeden

#### 3.3.4.1. AQUIFERE DU CRETACE (LE CONTINENTAL INTERCALAIRE SS : CI)

Il est présent partout sauf dans le bassin à l'ouest où il est limité par la suture panafricaine et à l'est entre les massifs du Damagaram-Mounio et le bouclier nigérian (fig. 5).

##### a - Nature du réservoir

C'est un ensemble de séries détritiques continentales [Greigert, 1967 ; 1978 ; Margat, 1982 ; Fabre, 1983 ; Bellion, 1989]. Connue au nord et à l'est sous le nom de Continental intercalaire composé des grès du Tégama surmontés par la série argileuse du Farak, il passe latéralement au sud à des dépôts grossiers du Continental Hamadien. Celui-ci passe, plus au sud, dans le bassin de Sokoto au Nigéria, aux sables argileux et argiles de la *Gundumi Formation* et les sables et argiles de l'*Illo Formation*. Dans le sud du bassin du Tchad, le Continental intercalaire est représenté par les grès et argiles de la série de Léré. A l'ouest du bassin du Niger, par le graben de Gao, il passe au Continental intercalaire de l'Adrar du bassin de Taoudenni-Tanezrouft au Mali.

*b - Structure et géométrie*

Dans la partie centrale du bassin, il n'existe pas de forage ayant traversé le réservoir et atteint son substratum. Il n'est pas possible de dresser des cartes d'isohypses du mur et du toit. Nous avons approché sa structure par des coupes géologiques à travers tout le bassin (fig. 6). Il est principalement affecté par la dorsale d'In Guezzam, la suture panafricaine et le linéament guino-nubien. Son épaisseur maximale dépasse 1000m. Dans le bassin de Sokoto, son épaisseur varie de 240 à 300m [Margat, 1982]. Le Continental intercalaire occupe une disposition synclinale à pendages très faibles d'axe subméri dien [Greigert, 1967 ; 1978 ; Bellion, 1989].

3.3.4.2. AQUIFERES DU TERTIAIRE (= CONTINENTAL TERMINAL CT)

Il affleure dans la partie méridionale et occidentale du bassin du Niger. Il se prolonge dans le bassin de Taoudenni par le graben de Gao à l'ouest (fig. 5).

Le Continental terminal, au Niger, correspond à un ensemble de trois séries détritiques continentales échelonnées de l'Eocène moyen au Mio-Pliocène : à la base, la série sidérolitique de l'Adrar Douchi (CT1), la série argilo-sableuse à lignites (CT2), et au sommet, les grès argileux du Moyen Niger (CT3), [Greigert, 1967].

A la lumière des travaux récents [Bellion, 1989], le Continental terminal exclut le CT1. D'autre part, le CT3 est considéré comme le Continental terminal au sens strict. Celui-ci est représenté, dans le NW du Nigéria (SW du bassin du Niger), par la *Gwandu Formation* en discordance sur le *Sokoto Group*, le *Rima Group* et l'*Illo Group*.

Dans le but de comprendre les manifestations hydrogéologiques, nous considérons le Continental terminal comme l'ensemble des réservoirs gréseux CT1, CT2 et CT3. Le CT3, à nappe libre, intègre les alluvions quaternaires des dallois [Ousséini, 1991 ; Ousséini et al., 1992].

Les cartes d'isohypses du mur et du toit de ces réservoirs ainsi que leur piézométrie, sont tirées des travaux de Boeckh [1965] revues par Bonnier [1990]. Nous avons intégré ces données en considérant l'extension totale de chaque réservoir pour leur utilisation à l'une des prochaines étapes de notre travail.

*a - Aquifère du CT1*

Il n'existe pas dans la partie centrale du bassin (annexe 7). Son substratum est pratiquement constitué des argiles du Paléocène mettant en charge le CI sauf à l'ouest où le réservoir repose sur le socle. Les isohypses du mur montrent une disposition synclinale d'axe NNW-SSE. Cette structure est respectée par les isohypses du toit constitué d'Argiles et de silts. Son épaisseur moyenne varie de la périphérie au centre du bassin respectivement de 10 à 70m.

*b - Aquifère du CT2*

Les isohypses du mur expriment une structure synclinale d'axe NE-SW (annexe 8). La carte du toit de l'aquifère suit la même configuration. Son épaisseur varie de 20 à 50m respectivement du bord vers le centre du synclinal.

*c - Aquifère du CT3*

Les isohypses du mur constitué d'argiles et de silts, montrent une disposition synclinale d'axe subméri dien (annexe 9). L'épaisseur du réservoir varie de la périphérie vers le centre de l'aquifère respectivement 20 à 50m.

### 3.5. Conclusion

L'élaboration d'une banque de données factuelles analytiques, sur la base de 1330 forages sélectivement classés, a permis d'individualiser et de schématiser 13 aquifères, du Cambro-Ordovicien au Quaternaire.

Les cartes d'isohypses du mur et du toit de chaque aquifère ainsi que les coupes établies à travers ces aquifères montrent que le bassin du Niger se présente en un ensemble de bassins subsidents d'axes nord-sud hérités de mouvements verticaux du socle en horst et graben.

# *Chapitre 4*

*Etude Hydrodynamique des  
Aquifères Profonds et Superficiels du  
Bassin du Niger*

## Chapitre 4

---

# Etude Hydrodynamique des Aquifères Profonds et Superficiels du Bassin du Niger

4.1. Aquifère du Cambro-Ordovicien.....	47
4.1.1. Piézométrie.....	47
4.1.2. Paramètres hydrodynamiques .....	47
4.1.3. Hydrochimie .....	48
4.2. Aquifère du Dévonien inférieur.....	48
4.2.1. Piézométrie.....	48
4.2.2. Paramètres hydrodynamiques .....	49
4.2.3. Hydrochimie .....	49
4.3. Aquifère du Viséen inférieur (Farrazékat) .....	50
4.3.1. Piézométrie.....	50
4.3.2. Paramètres hydrodynamiques .....	50
4.3.3. Hydrochimie .....	50
4.4. Aquitard du Namurien inférieur (Guezouman).....	50
4.4.1. Piézométrie.....	50
4.4.2. Paramètres hydrodynamiques .....	50
4.4.3. Hydrochimie .....	50
4.5. Aquifère du Namurien supérieur (= Tarat) .....	51
4.5.1. Piézométrie.....	51
4.5.2. Paramètres hydrodynamiques .....	51
4.5.3. Hydrochimie .....	51
4.6. Aquitard du Permien (Izégouande) .....	51
4.6.1. Piézométrie.....	51
4.6.2. Paramètres hydrodynamiques .....	52
4.6.3. Hydrochimie .....	52
4.7. Aquifères du Trias - Jurassique (Groupe d'Agadès) .....	52
4.7.1. Aquifères du Trias - Jurassique inférieur.....	52
4.7.1.1. Piézométrie.....	52
4.7.1.2. Caractères physiques et hydrodynamiques .....	53
4.7.1.3. Hydrochimie.....	53
4.7.2. Aquifère du Jurassique supérieur.....	54

4.7.2.1. Piézométrie.....	54
4.7.2.2. Paramètres hydrodynamiques.....	54
4.7.2.3. Hydrochimie.....	55
4.7.3. Aquifère du Groupe des grès d'Agadès.....	55
4.7.3.1. Piézométrie.....	55
4.7.3.2. Paramètres hydrodynamiques.....	55
4.7.3.3. Hydrochimie.....	56
4.9. Aquifère du Crétacé (Le Continental intercalaire CI au sens strict).....	58
4.8.1. Piézométrie.....	58
4.8.2. Paramètres hydrodynamiques.....	59
4.8.3. Hydrochimie.....	59
4.9. Continental terminal 1 CT1.....	61
4.9.1. Piézométrie.....	61
4.9.2. Paramètres hydrodynamiques.....	61
4.9.3. Hydrochimie.....	61
4.10. Aquifère du CT2.....	61
4.10.1. Piézométrie.....	61
4.10.2. Paramètres hydrodynamiques.....	61
4.10.3. Hydrochimie.....	61
4.11. Aquifère du CT3.....	62
4.11.1. Piézométrie.....	62
4.11.2. Paramètres hydrodynamiques.....	62
4.11.3. Hydrochimie.....	62
4.12. Aquifères superficiels.....	62
4.13. Relations hydrodynamiques entre les aquifères superposés paléozoïques et mésozoïques ...	63
4.13.1. Nappes du Cambro-Ordovicien et du Dévonien inférieur.....	63
4.13.2. Nappes du Dévonien inférieur et du Viséen inférieur.....	64
4.13.3. Nappes du Viséen inférieur et du Namurien supérieur.....	64
4.13.4. Nappes du Namurien supérieur et du Trias-Jurassique inférieur.....	64
4.13.5. Nappes du Trias-Jurassique inférieur et Jurassique supérieur.....	64
4.13.6. Nappes du Continental intercalaire CI et CT1.....	65
4.13.7. Nappes du CT1 et du CT2.....	65
4.13.8. Nappes du CT2 et du CT3.....	65
4.13.9. Conclusion.....	65
4.14. Essai de définition des conditions aux limites hydrogéologiques du bassin du Niger.....	65
4.14.1. Le Cambro-Ordovicien.....	65
4.14.2. Le Dévonien inférieur.....	66
4.14.3. Le Viséen inférieur.....	67
4.14.4. Le Namurien supérieur.....	67
4.14.5. Aquifère du Trias-Jurassique inférieur.....	67
4.14.6. Le Jurassique supérieur.....	67
4.14.7. L'aquifère du Continental intercalaire CI.....	67
4.14.8. Les aquifères du Continental Terminal CT.....	67
4.14.9. Aquifères quaternaires.....	67
4.15. Carte hydrogéologique du bassin de l'Irhazer au 1:500'000 (Aquifères des grès d'Agadès)...	68

4.15.1. Aquifères continus.....	68
4.15.2. Aquifères discontinus.....	72
4.15.3. Formations semi-perméables.....	72
4.15.4. Formations non-aquifères.....	72
4.15.5. Lithologie.....	72
4.15.6. Points d'eau.....	72
4.15.7. Piézométrie.....	72
4.15.8. Hydrochimie.....	72
4.15.9. Modèles conceptuels d'écoulement souterrain.....	74
4.16. Conclusion.....	74

C'est l'étape fondamentale dans la reconnaissance détaillée de l'aquifère en vue de représenter au mieux son(ses) comportement(s) hydrodynamique(s) sur la base d'observations naturelles disponibles collectées et sélectivement classées dans la banque de données.

Chaque aquifère sera appréhendé par sa structure (isohypses du mur et du toit), la morphologie de sa surface piézométrique (isopièzes), le champ des caractères physiques et hydrodynamiques et enfin par le chimisme de eaux (la salinité, <sup>14</sup>C, <sup>4</sup>He) selon les données disponibles.

Ainsi que nous l'avons souligné dans le premier chapitre, la définition des conditions aux limites hydrogéologiques des aquifères du Groupe des grès d'Agadès, d'une part septentrionale et d'autre part occidentale et méridionale, nous a amené à étudier respectivement les réservoirs paléozoïques jusqu'au Cambro-Ordovicien dans le synclinal de Tin Séririne, et les réservoirs mésozoïques et quaternaires dans le sous-bassin d'Iullemeden. Aussi, nous entamerons ce présent chapitre par l'aquifère du Cambro-Ordovicien.

#### 4.1. Aquifère du Cambro-Ordovicien

##### 4.1.1. Piézométrie

L'aquifère est partout captif excepté dans sa partie septentrionale affleurante (fig. 23). Les isopièzes décroissent du nord vers le sud respectivement de 560 à 440m. L'écoulement de la nappe n'est pas uniforme. L'aquifère est à nappe radiale divergente dont l'axe principal est orienté NNE-SSW. Le gradient hydraulique est de  $5.0 \times 10^{-4}$ . La limite septentrionale est représentée par le "biseau sec" [Benabderahmane et al., 1983].

##### 4.1.2. Paramètres hydrodynamiques

Les données obtenues sont situées aux extrémités occidentale et orientale du synclinal de Tin Séririne. Elles sont présentées dans le tableau ci-dessous :

	Partie occidentale	Partie orientale
Perméabilité [m/s]	$1.3 \times 10^{-2}$	$4.5 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-4}$
Transmissivité [m <sup>2</sup> /s]	$9 \text{ à } 11 \times 10^{-3}$	$4.2 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-2}$
Coefficient d'emmagasinement	$5 \times 10^{-3}$ en nappe libre	$2 \times 10^{-4}$ en nappe captive

Tableau 5 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Cambro-Ordovicien.

Le débit spécifique varie de 0.04 à 8 m<sup>3</sup>/h/m.

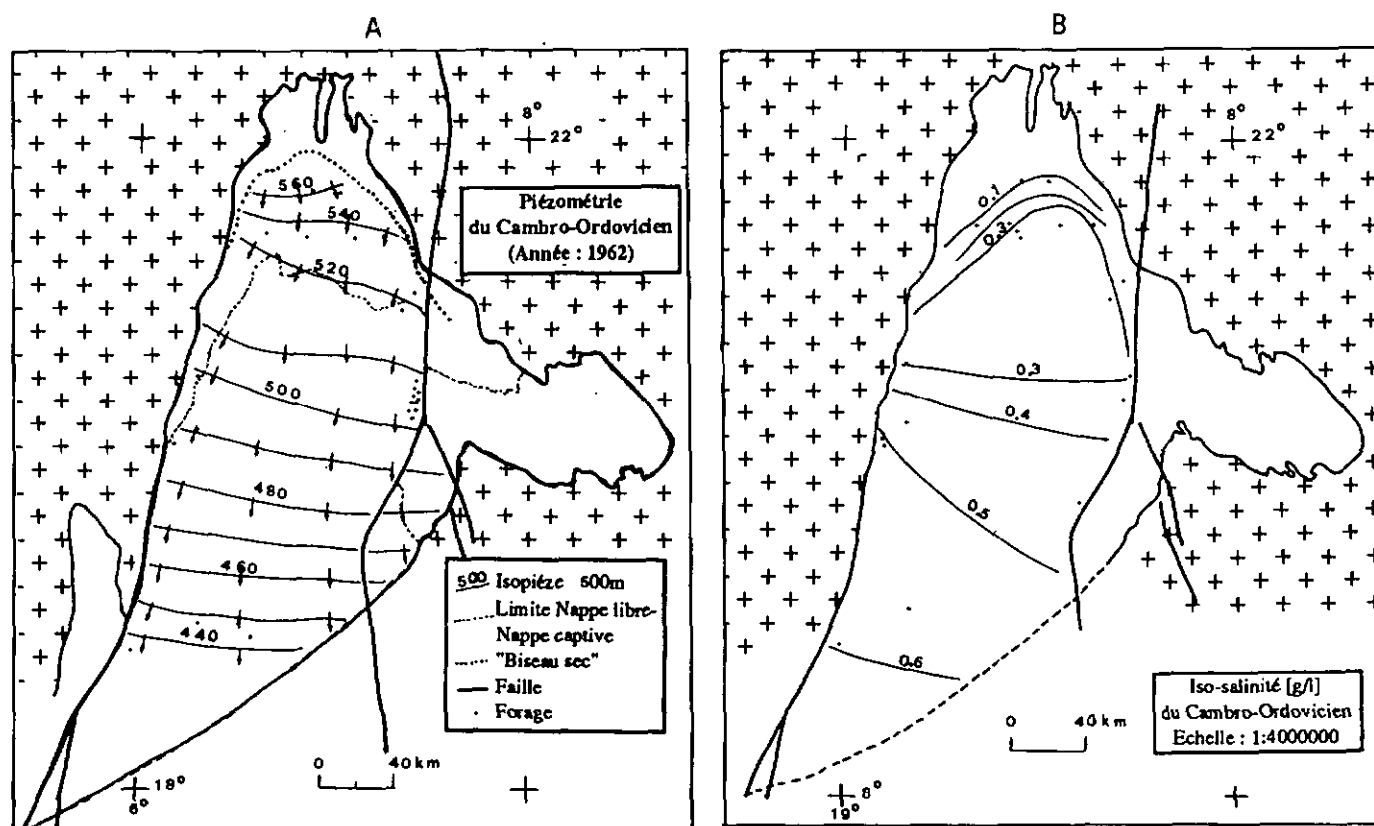


Figure 23: Carte piézométrique (A) et de salinité (B) de l'aquifère du Cambro-Ordovicien.

#### 4.1.3. Hydrochimie

Nous avons à notre disposition les données sur la salinité [g/l], (fig. 23). Un gradient de salinité nord-sud (respectivement de 0.1 à 0.6 g/l) rend compte du sens d'écoulement conforme au gradient piézométrique et l'allure générale des isohypses (fig. 19). Les eaux sont plus douces au nord qu'au sud. La température des eaux atteint des valeurs de 61°C au sud.

### 4.2. Aquifère du Dévonien inférieur

#### 4.2.1. Piézométrie

La zone à l'est de la flexure-faille d'In Azaoua-Arlit (fig. 24) a été délibérément écartée faute de données hydrodynamiques.

L'aquifère est captif sauf dans sa partie périphérique septentrionale. L'écoulement n'est pas uniforme. L'aquifère est à nappe radiale divergente ; son axe principal est orienté NE-SW. Les isopièzes décroissent du nord vers le sud respectivement de 520 à 410m. Le gradient hydraulique est de  $4 \times 10^{-4}$ .

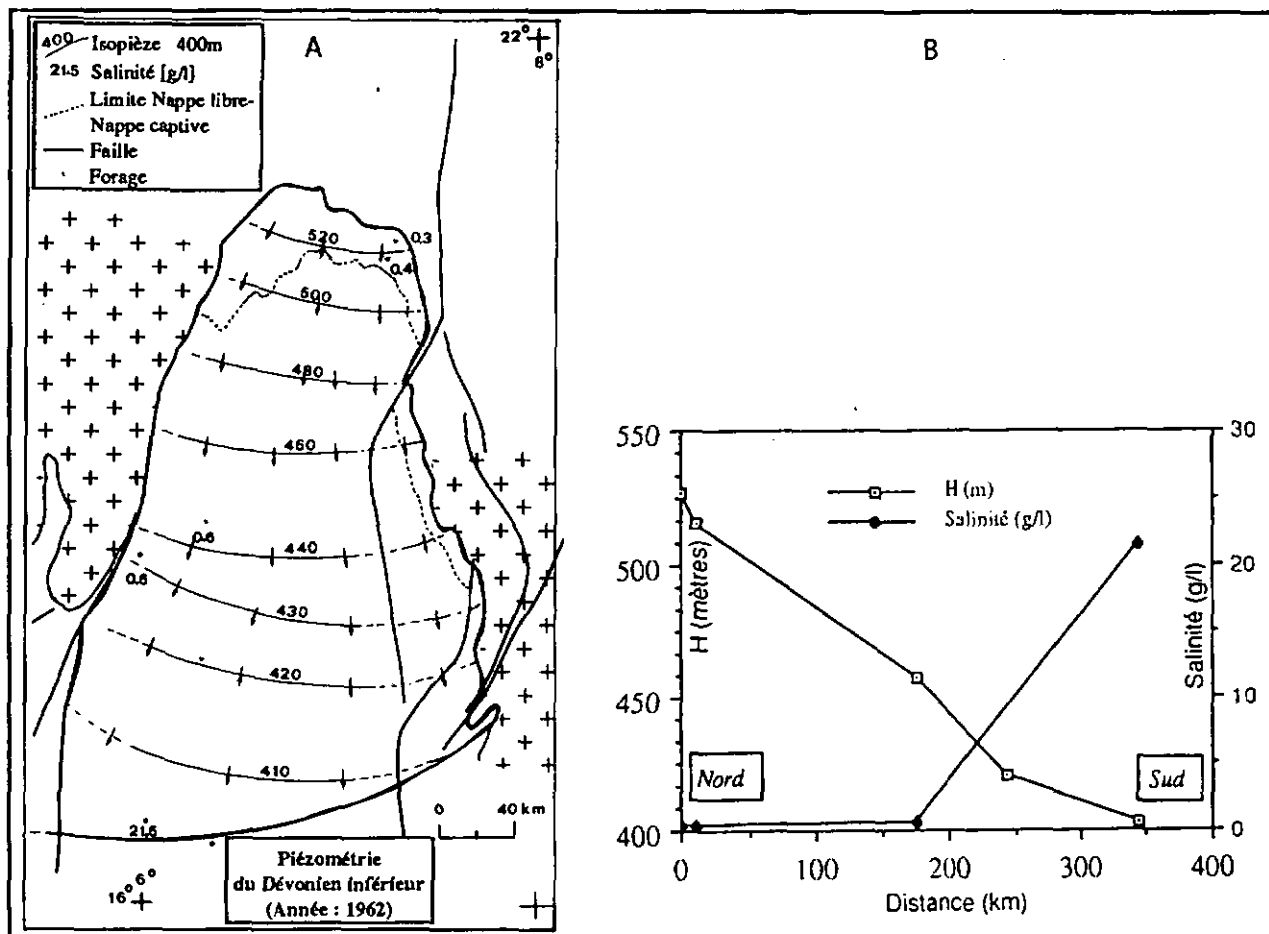


Figure 24 : Aquifère du Dévonien inférieur : A. - Carte piézométrique et champ des paramètres chimiques (salinité). B. - Evolution du potentiel et de la salinité.

#### 4.2.2 Paramètres hydrodynamiques

Les valeurs sont présentées dans le tableau 6.

	Nord	Sud
Perméabilité K [m/s]	$2.5 \times 10^{-4}$	$1.65 \times 10^{-5}$
Transmissivité [ $m^2/s$ ]	$2.6 \times 10^{-2}$	$7.1 \times 10^{-3}$
Porosité efficace $n_e$	8%	10%
Débit spécifique [ $m^3/h/m$ ]	0.05	0.5

Tableau 6 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Dévonien inférieur.

#### 4.2.3 Hydrochimie

Les eaux sont douces au nord [0.3g/l] et très minéralisées au sud [21.5g/l] (fig. 24). Le gradient général de salinité nord-sud est conforme aux observations piézométriques. La température des eaux varie de 56°C au nord à 58°C au sud.

### 4.3. Aquifère du Viséen inférieur (Farrazékat)

#### 4.3.1. Piézométrie

L'aquifère est captif partout sauf dans sa partie périphérique septentrionale. Celle-ci est dépourvue de forage. La très faible densité de forages notamment de part et d'autre des flexures-failles nous conduit à interrompre le tracé des isopièzes à l'aplomb de ces accidents ainsi qu'à la limite lithologique du réservoir.

L'écoulement n'est pas uniforme. L'aquifère est à nappe divergente. On distingue deux axes principaux d'écoulement, l'un convergent vers le centre de la cuvette, l'autre vers la dorsale d'In Guezzam. Un seuil hydraulique orienté NNE-SSW est en relation avec la structure anticlinale signalée plus haut (annexe 10). L'écoulement est dirigé en partie vers le centre du bassin à l'est, en partie vers la dorsale d'In Guezzam à l'ouest. Celle-ci ne semble pas jouer le rôle de barrière hydraulique. Le gradient hydraulique moyen vers le centre du bassin est de  $8.7 \times 10^{-4}$  ; il est de  $2 \times 10^{-4}$  vers la dorsale.

#### 4.3.2. Paramètres hydrodynamiques

Les valeurs moyennes sur 4 forages de la perméabilité sont de  $2.3 \times 10^{-4}$  m/s celle de la transmissivité de  $3.2 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s, la porosité efficace de 10% et le débit spécifique de 0.4 m<sup>3</sup>/h/m.

#### 4.3.3. Hydrochimie

La salinité croît du nord-est [1g/l] vers le sud-ouest [24g/l]. Le gradient de salinité général NE-SW corrobore les observations piézométriques (annexe 10). La température des eaux varie de 52°C au nord à 63°C au sud.

### 4.4. Aquitard du Namurien inférieur (Guezouman)

Rappelons que ce réservoir secondaire est étudié seulement dans le périmètre minier d'Arlit.

#### 4.4.1. Piézométrie

Le manque de forages de part et d'autre des flexures-failles NS et N30 et les failles N80 à N90 nous amène à dresser la piézométrie en éliminant les rôles éventuels de ces accidents. A l'ouest de la flexure-faille NS, le réservoir secondaire est atteignable à partir de 200m plus bas (annexe 11).

L'écoulement n'est pas uniforme. Le réservoir est à nappe divergente du SE vers le NW. Le gradient hydraulique moyen est de  $3.5 \times 10^{-3}$ .

#### 4.4.2. Paramètres hydrodynamiques

Les valeurs de la transmissivité sont comprises entre  $3.3 \times 10^{-7}$  à  $2.6 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s, celles du coefficient d'emmagasinement de  $8.1$  à  $6.5 \times 10^{-5}$ , et enfin, celles du débit spécifique de 0.01 à 0.3 m<sup>3</sup>/h/m.

#### 4.4.3. Hydrochimie

Les eaux sont bicarbonatées sodiques. La salinité varie de 0.5 à 1.9g/l.

#### 4.5. Aquifère du Namurien supérieur (= Tarat)

##### 4.5.1. Piézométrie

La densité des forages ayant servi au tracé des isopièzes (1962) est nettement plus élevée dans le périmètre minier d'Arlit que dans le reste du bassin. Pour cette raison, nous avons délibérément éliminé les rôles hydrogéologiques éventuels des accidents dans le bassin. Les traits discontinus marquent les zones dépourvues de données piézométriques.

L'aquifère est captif sauf dans sa partie périphérique septentrionale et orientale (annexe 12). Le module d'espacement des isopièzes croît d'est vers l'ouest et du nord vers le sud dans l'axe du synclinal. L'écoulement n'est pas uniforme. L'aquifère est à nappe radiale convergente vers l'ouest dont l'axe de drainage est orienté est-ouest. Le gradient hydraulique moyen ESE-WNW est de  $6.2 \times 10^{-4}$  ; il est de  $2.1 \times 10^{-5}$  dans la direction NS et de  $2.3 \times 10^{-5}$  dans l'axe de drainage EW.

La piézométrie élaborée dans le périmètre minier confirme le sens général d'écoulement ESE-WNW. 115 forages (en 1989) captent cet aquifère. Les accidents n'ont pas été pris en compte.

##### 4.5.2. Paramètres hydrodynamiques

A partir des forages pétroliers dans l'axe du synclinal, des valeurs moyennes de  $2.6 \times 10^{-4}$  de la perméabilité ont été enregistrées. Dans le périmètre minier d'Arlit, les valeurs sont les suivantes :

Transmissivité [m <sup>2</sup> /s]	1.6 10 <sup>-4</sup> à 1 10 <sup>-2</sup>
Coefficient d'emmagasinement	3.0 10 <sup>-5</sup> - 6.0 10 <sup>-4</sup> .
Porosité efficace [%]	14
Débit spécifique [m <sup>3</sup> /h/m]	0.3 - 3.5

Tableau 7 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Namurien supérieur.

##### 4.5.3. Hydrochimie

La salinité croît du nord [0.3g/l] et de l'est [0.3 - 0.4g/l] vers le sud-ouest [28.7g/l]. Les gradients de salinité NS, EW et ESE-WNW suivent la décroissance des isopièzes observée. Dans le périmètre minier, les eaux sont bicarbonatées sodiques.

Des teneurs en <sup>14</sup>C notamment dans le périmètre minier décroissent d'est [7%PMC] vers l'ouest [4%PMC] ; elles suivent l'évolution des isopièzes ; dans la partie occidentale de la flexure-faille d'In Azaoua-Arlit notamment au centre du bassin, les teneurs sont très faibles [0.9%PMC].

#### 4.6. Aquitard du Permien (Izégouande)

##### 4.6.1. Piézométrie

Elle a été réalisée uniquement dans le périmètre minier d'Arlit (annexe 13). Le tracé des isopièzes ne prend pas en compte les accidents à défaut de forages de part et d'autre de ceux-ci.

Le module d'espacement des isopièzes croît du SE vers le NW. Les isopièzes varient de 40m au SE à 395m au NW. L'écoulement n'est pas uniforme. Le réservoir est à nappe divergente. Le gradient hydraulique moyen est de  $3 \times 10^{-3}$ .

#### 4.6.2. paramètres hydrodynamiques

Ces paramètres sont obtenus uniquement dans les périmètres miniers d'Arlit et de Teguida NTessoum.

Perméabilité [m/s]	$7.8 \times 10^{-8} - 1.1 \times 10^{-6}$
Transmissivité [m <sup>2</sup> /s]	$5.0 \times 10^{-5} - 2.7 \times 10^{-4}$
Débit spécifique [m <sup>3</sup> /h/m]	0.01 - 0.09

Tableau 8 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquitard du Permien à Arlit.

#### 4.6.3. Hydrochimie

Dans le périmètre minier d'Arlit, les eaux sont carbonatées calciques. La salinité varie de 0.3 à 6g/l. A Teguida NTessoum, la salinité varie de 6 à 13 g/l. Des teneurs en chlorures de 1 à 2g/l ont été obtenues.

Perméabilité [m/s]	$2.2 \times 10^{-6} - 1.1 \times 10^{-5}$
Transmissivité [m <sup>2</sup> /s]	$5.0 \times 10^{-2}$ (nappe libre) $2.7 \times 10^{-4}$ (nappe captive)
Débit spécifique [m <sup>3</sup> /h/m]	0.2 - 0.8

Tableau 9 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquitard du Permien à Teguida NTessoum.

### 4.7. Aquifères du Trias - Jurassique (Groupe d'Agadès)

#### 4.7.1. Aquifères du Trias - Jurassique inférieur

##### 4.7.1.1. PIEZOMETRIE

Il est partout captif sauf dans sa partie périphérique septentrionale et orientale (fig. 25a). Cette zone est caractérisée par la présence du "biseau sec". Les isopièzes ont été dessinées en trait discontinu de part et d'autre des accidents tectoniques.

D'une manière générale, le module d'espacement des isopièzes croît d'est vers l'ouest. On note une décroissance des isopièzes d'est vers le nord-ouest, l'ouest et le sud. La flexure-faille NS traduit une anomalie piézométrique par une augmentation brusque du module d'espacement. On enregistre un décalage piézométrique d'au moins 10m. Un autre décalage piézométrique d'au moins 25m est observable de part et d'autre de la faille N80 d'Azélik. Ces deux accidents sont jalonnés d'une multitude de sources. L'aquifère est à nappe divergente à tendance radiale à l'ouest de la flexure-faille d'axes SE-NW et EW. Les gradients hydrauliques moyens sont de  $2.8 \times 10^{-4}$  en SE-NW et  $4 \times 10^{-4}$  en EW.

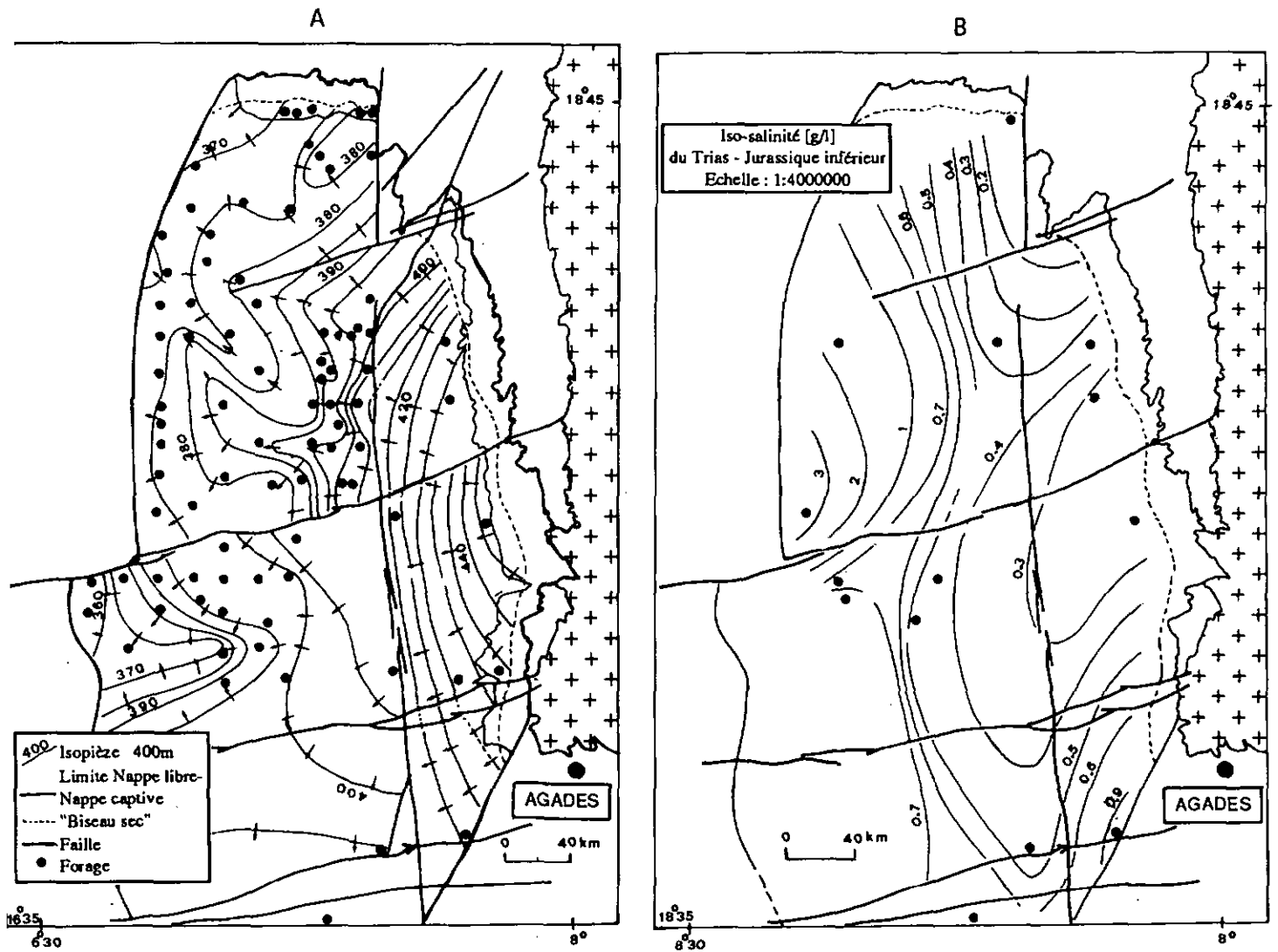


Figure 25 : Carte piézométrique (A) et isocones de salinité (B) du Trias + Jurassique inférieur.

#### 4.7.1.2. CARACTERES PHYSIQUES ET HYDRODYNAMIQUES

Les valeurs sont regroupées dans le tableau suivant.

Transmissivité [m <sup>2</sup> /s]	2.2 x 10 <sup>-4</sup> - 1.1 x 10 <sup>-5</sup>
Coefficient d'emmagasinement	26% (nappe libre) 1.3 à 6.3 x 10 <sup>-4</sup> (nappe captive)
Débit spécifique [m <sup>3</sup> /h/m]	0.15 à 3.3

Tableau 10 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Trias-Jurassique inférieur.

#### 4.7.1.3. HYDROCHIMIE

Les eaux sont en général douces à l'est de la flexure-faille [0.2 g/l à 0.9g/l] (fig. 25b) ; à l'ouest de

l'accident, la salinité atteint des valeurs de 3.8g/l. Le gradient de salinité SE-NW, EW et NE-SW est conforme aux observations piézométriques.

Les teneurs en  $^{14}\text{C}$  varient de 50 à 30 %PMC à l'est de l'accident et dans la zone à nappe libre au nord. En revanche, à l'ouest de l'accident, les teneurs sont de l'ordre de la limite de détection [0.1%PMC].

#### 4.7.2. Aquifère du Jurassique supérieur

##### 4.7.2.1. PIEZOMETRIE

Quelques forages ont permis d'amorcer le tracé du "biseau sec" dans la partie orientale du réservoir (fig. 26a). Les isopièzes diminuent d'est (425m) vers l'ouest (385m). Le module d'espacement de celles-ci est décroissant d'est vers l'ouest. Les tracés discontinus ou interrompus des isopièzes se situent dans les zones dépourvues de données hydrodynamiques en particulier de part et d'autre des failles. L'écoulement n'est pas uniforme. L'aquifère est à nappe convergente ; son axe de drainage est orienté EW. On observe un écoulement vers le sud-ouest.

L'accident NS engendre une anomalie piézométrique en décalant les isopièzes jusqu'à 15m environ au centre du réservoir. Le gradient hydraulique moyen est de  $6.0 \cdot 10^{-4}$  en EW et  $2.5 \cdot 10^{-4}$  en NE-SW.

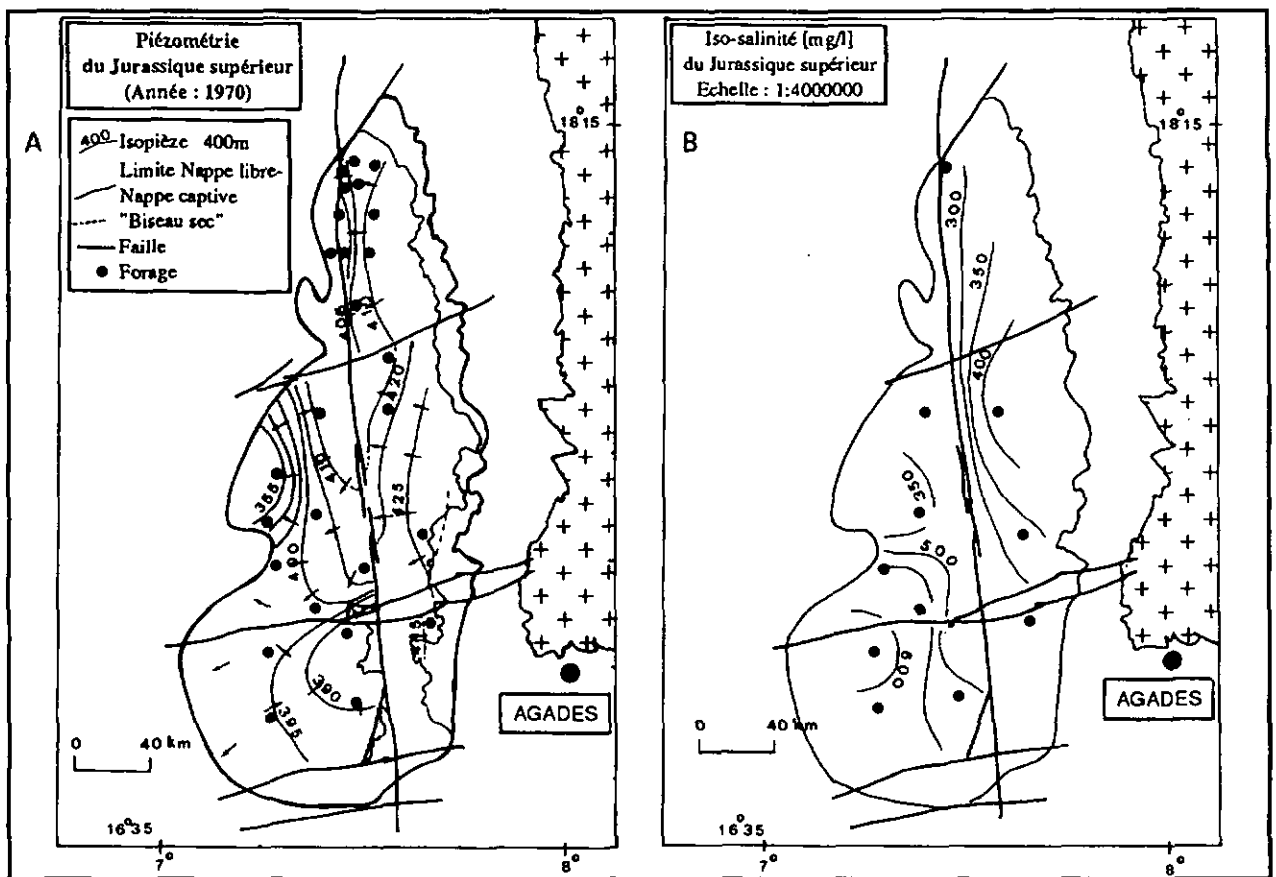


Figure 26 : Carte piézométrique (A) et isocones de salinité (B) de l'aquifère du Jurassique supérieur.

##### 4.7.2.2. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

Transmissivité [m <sup>2</sup> /s]	5.6 x 10 <sup>-5</sup> - 1.2 x 10 <sup>-2</sup>
Coefficient d'emmagasinement	26% (nappe libre) 8 x 10 <sup>-5</sup> - 2 x 10 <sup>-4</sup> (nappe captive)
Débit spécifique [m <sup>3</sup> /h/m]	3 - 11

Tableau 11 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Jurassique supérieur.

#### 4.7.2.3. HYDROCHIMIE

Les eaux sont douces à l'est de la flexure-faille NS [0.2 à 0.3g/l] (fig. 26b). En revanche, à l'ouest de celui-ci, la salinité varie de 0.3 à 0.6g/l (plus à l'ouest). Le gradient de salinité EW et NE-SW suit l'évolution des isopièzes.

Les teneurs en <sup>14</sup>C sont comprises entre 80 et 60%PMC à l'est de l'accident NS ; à l'ouest, les teneurs sont inférieures à 1%PMC.

#### 4.7.3. Aquifère du Groupe des grès d'Agadès

Nous avons élaboré la carte piézométrique en considérant uniquement les forages qui captent *simultanément* les deux réservoirs ainsi que l'aquifère d'Acheki à l'est de la dorsale de Tafadek dans la partie méridionale de l'Irhazer. Notre démarche a pour but de comparer cette carte avec celles des deux réservoirs et d'apporter quelques précisions sur certaines zones d'ombres mentionnées plus haut.

##### 4.7.3.1. PIEZOMETRIE

Les isopièzes décroissent dans une direction générale est-ouest (fig. 27). L'écoulement n'est pas uniforme. L'aquifère est à nappe divergente ; les principaux axes d'écoulement sont orientés SE-NW, EW et NE-SW ; les deux premières directions sont conformes aux axes de drainage. Les gradients hydrauliques moyens sont de 6 x 10<sup>-4</sup> en SE-NW, 7.3 x 10<sup>-4</sup> en EW et 2 x 10<sup>-3</sup> en NE-SW.

Les seuls exutoires naturels observables sont les sources qui jalonnent l'accident NS (partie est) et certains N70. Une aire d'artésianisme de 5500km<sup>2</sup> a été délimitée à l'aide de 41 forages jaillissants (jusqu'à +13m au-dessus du sol, 1970).

La densité des forages apporte des précisions sur le tracé du "biseau sec" et sur les rôles hydrogéologiques des accidents tectoniques. La flexure-faille d'In Azaoua-Arlit et la faille N80 d'Azélik décalent les niveaux piézométriques jusqu'à 25m, valeur significative car nettement supérieure à la précision du nivellement barométrique. Ce décalage piézométrique est confirmé par ces sources. En effet, ces accidents mettent en contact, *par endroits*, des aquifères avec des formations semi-perméables (fig. 17b).

Malgré la forte densité des points d'eau pris en compte, la limite méridionale des aquifères du Groupe des grès d'Agadès demeure inconnue.

##### 4.7.3.2. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Les valeurs sont regroupées dans le tableau ci-après.

Transmissivité [m <sup>2</sup> /s]	$3 \times 10^{-4} - 1.5 \times 10^{-2}$
Coefficient d'emmagasinement	$6 \times 10^{-5} - 1.8 \times 10^{-4}$
Débit spécifique [m <sup>3</sup> /h/m]	0.08 - 28

Tableau 12 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Groupe des grès d'Agadès.

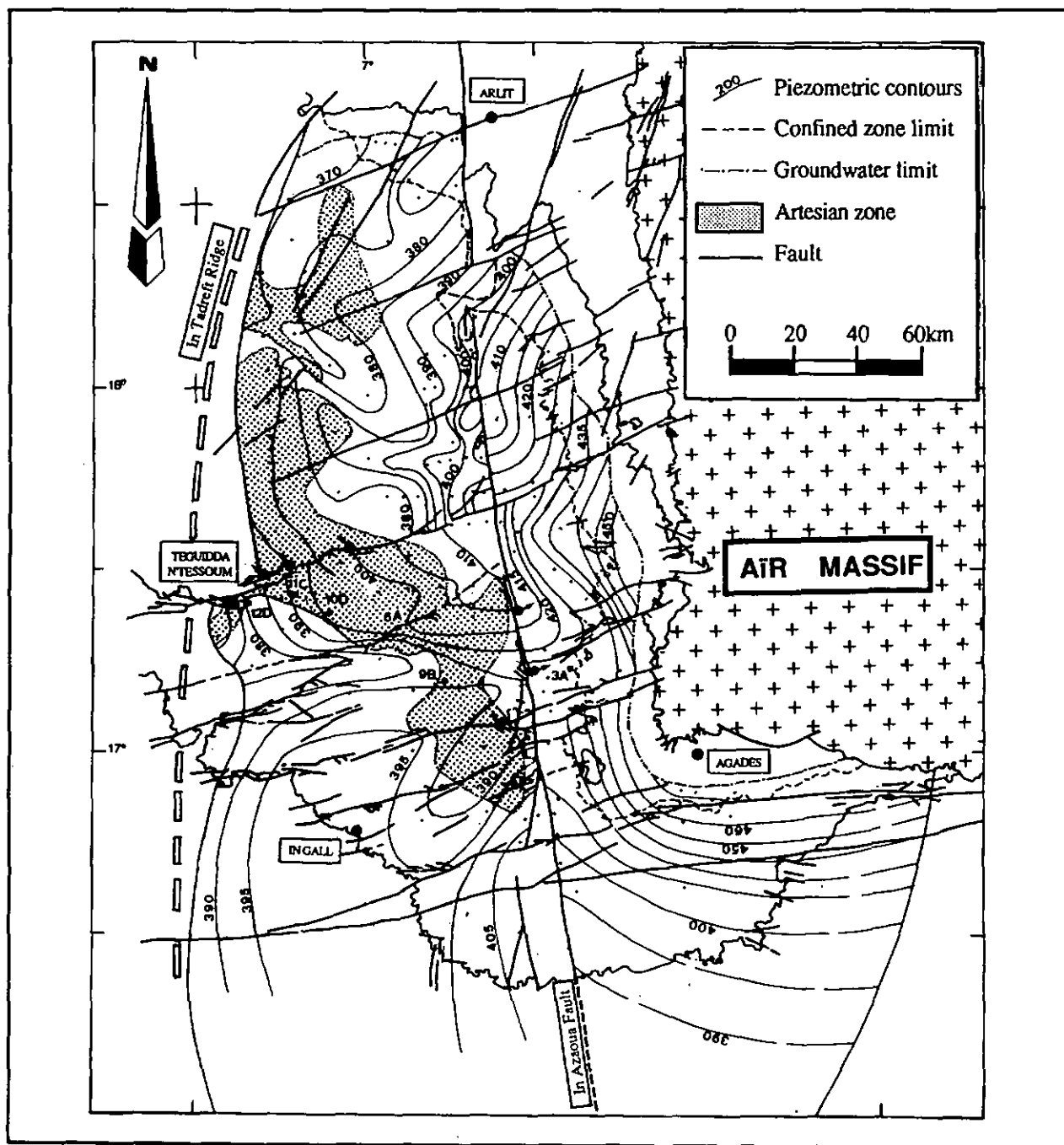


Figure 27 : Carte piézométrique de l'aquifère du Trias + Jurassique (Groupe des grès d'Agadès).

#### 4.7.3.3. HYDROCHIMIE

Des données de salinité et d'Hélium [Andrews & al., 1992] ont été comparées au potentiel hydraulique selon une coupe transversale d'orientation générale SE-NW (fig. 28). La décroissance d'est en ouest de la

charge correspond à l'augmentation des teneurs de la salinité et de l'Hélium ( $^4\text{He}$ ).

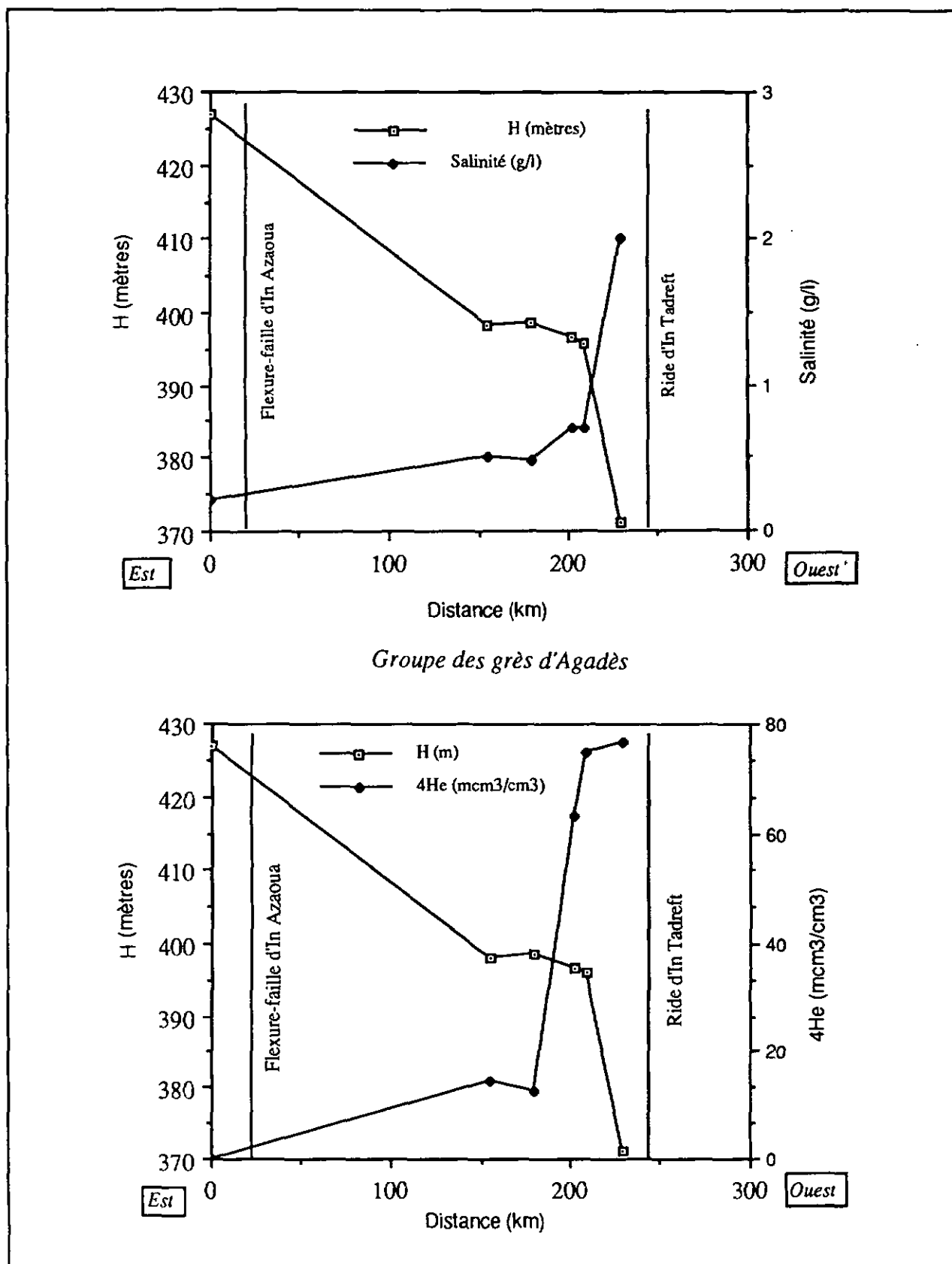


Figure 28 : Evolution du potentiel hydraulique, de la salinité et de l'Hélium d'est en ouest (Sous-bassin de l'Irhazer).

#### 4.9. Aquifère du Crétacé (Le Continental Intercalaire CI au sens strict)

##### 4.8.1. Piézométrie

La première carte piézométrique a été établie par Greigert [1978], elle intéresse la partie occidentale d'Iullemeden où l'aquifère est captif sous 100 à 700m. Elle fut ensuite complétée dans le bassin de Sokoto [Margat, 1982] et partiellement à l'est [Bonnier et al., 1992]. Nous avons apporté des précisions en considérant l'intégralité de l'aquifère dans son contexte régional sur la base de nos données (fig. 29).

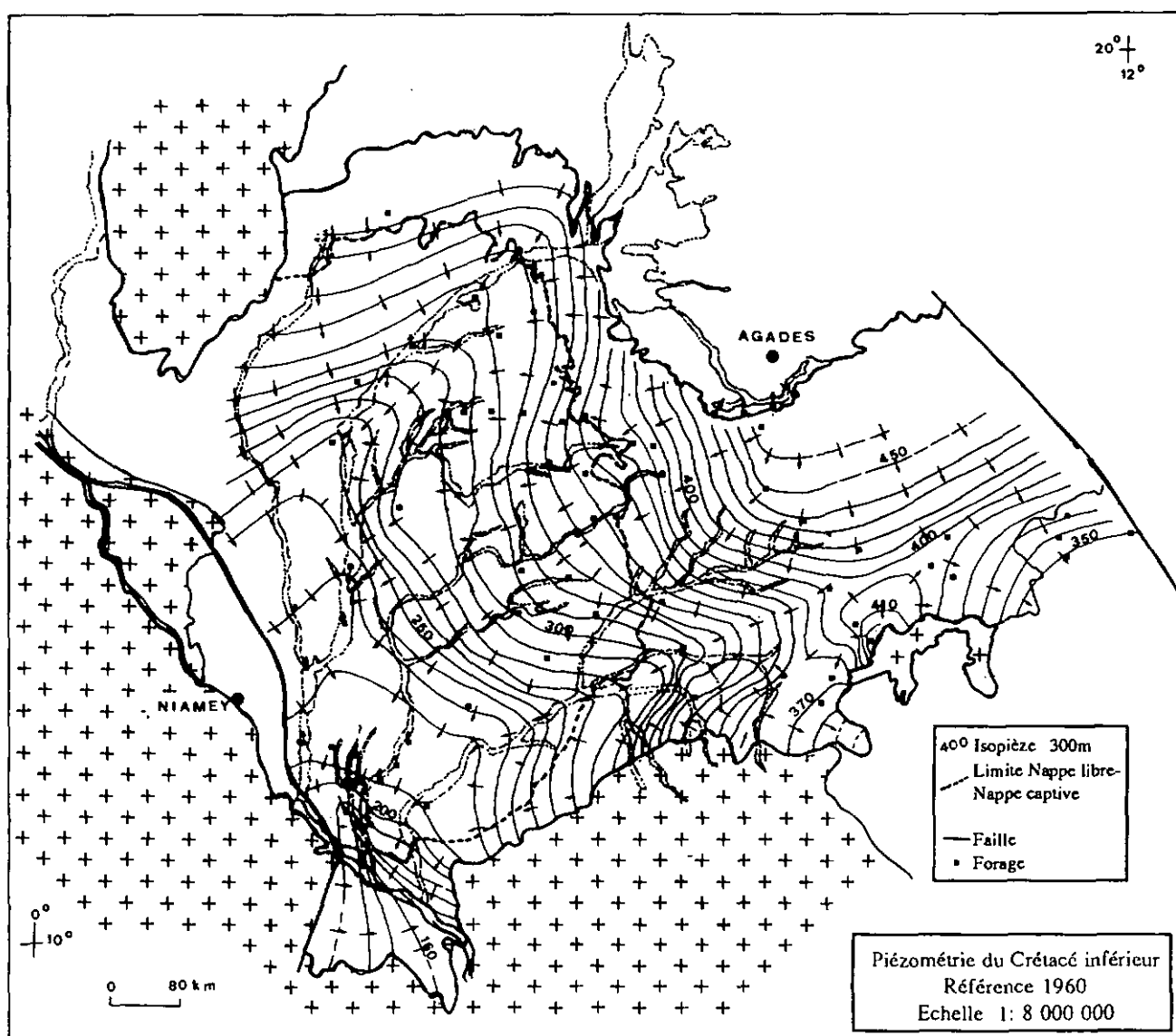


Figure 29 : Carte piézométrique de l'aquifère du Continental intercalaire CI au sens strict.

La ligne NNW-SSE suivant Agadès-Zinder partage les eaux souterraines. Elle correspond au môle composé de l'extrémité orientale du Hoggar, l'Aïr et le Damagaram-Mounio [Bigotte & Obellianne, 1968]. Aussi, nous distinguons un bassin occidental et un bassin oriental de part et d'autre de ce môle.

Dans le bassin occidental, l'aquifère est à nappe radiale convergente vers le fleuve au sud-ouest où il est artésien (+28m au-dessus du sol, 1967). Dans cette zone, le fleuve est drainant. Il existe deux axes de

drainage à l'aplomb de l'oued Azaouak au nord et le goulbi de Maradi au sud. Le gradient hydraulique moyen est de  $2.6 \times 10^{-4}$  au nord et de  $3.5 \times 10^{-4}$  au sud.

Dans le bassin oriental, l'aquifère est à nappe libre divergente. L'axe principal d'écoulement est orienté NW-SE vers le bassin tchadien. Les forages qui captent le réservoir au sud-est dans la cuvette tchadienne sont artésiens. Le gradient hydraulique moyen est de  $4 \times 10^{-4}$ .

#### 4.8.2. Paramètres hydrodynamiques

Une couche sableuse très transmissive (en moyenne de  $1 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ ) occupe la partie centrale du bassin occidental (annexe 14) avec son équivalent dans le bassin de Sokoto (*Gundumi Formation*) de  $1.1 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ . Ailleurs, les valeurs sont les suivantes :

	Niger	Sokoto (Nigéria)	Taoudenni (Mali)
Transmissivité [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$1 \times 10^{-3}$ à $1 \times 10^{-5}$	5 à $9 \times 10^{-5}$	
Coefficient d'emmag.	5% à 10% (nappe libre) $0.3$ à $5 \times 10^{-3}$ (nappe captive)	$2$ à $5 \times 10^{-4}$ (nappe captive)	5% à 8% (nappe libre)
Débit spécifique [ $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ ]	13	-	-

Tableau 13 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Continental intercalaire.

Le débit spécifique varie de 0.1 à  $26 \text{m}^3/\text{h}/\text{m}$  dans le bassin du Niger. Dans la couche transmissive du bassin occidental, il est en moyenne de  $13 \text{m}^3/\text{h}/\text{m}$  avec des extrêmes de 7 à  $26 \text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ . Dans le bassin oriental, le débit spécifique varie de 0.3 à  $6 \text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ .

#### 4.8.3. Hydrochimie

Les teneurs de la salinité [g/l], d'une manière générale, vont dans le sens des observations hydrogéologiques décrites sur la carte piézométrique (fig. 30).

Dans le bassin occidental, les eaux sont douces au nord [0.1g/l] et de plus en plus minéralisées au sud-ouest [1g/l]. Dans le bassin oriental, elles varient de 0.1 g/l au nord et au pied du massif de Damagaram-Mounio à 0.3g/l au sud.

D'une manière générale, le gradient de salinité est orienté NE-SW dans le bassin occidental et NNW-SSE dans le bassin oriental.

Les teneurs en  $^{14}\text{C}$  enregistrées dans le bassin occidental, varient de 96 à 113% au nord dans la zone à nappe libre ; au centre du bassin, elles sont de 3%. Vers le sud-ouest, les teneurs sont à la limite du seuil de détection (0.1%PMC) (fig. 31).

Si ses principaux exutoires sont le fleuve Niger au sud-ouest et le lac Tchad au sud-est, en revanche, le réservoir est mis en charge par un ensemble de calcaires marneux et argiles surmontés par les réservoirs tertiaires du Continental terminal. Des phénomènes de drainance peuvent exister entre ces réservoirs comme se fut le cas dans les aquifères profonds du sous-bassin Tin Séririne-Irhazer. Par conséquent, les aquifères du Continental terminal doivent être étudiés.

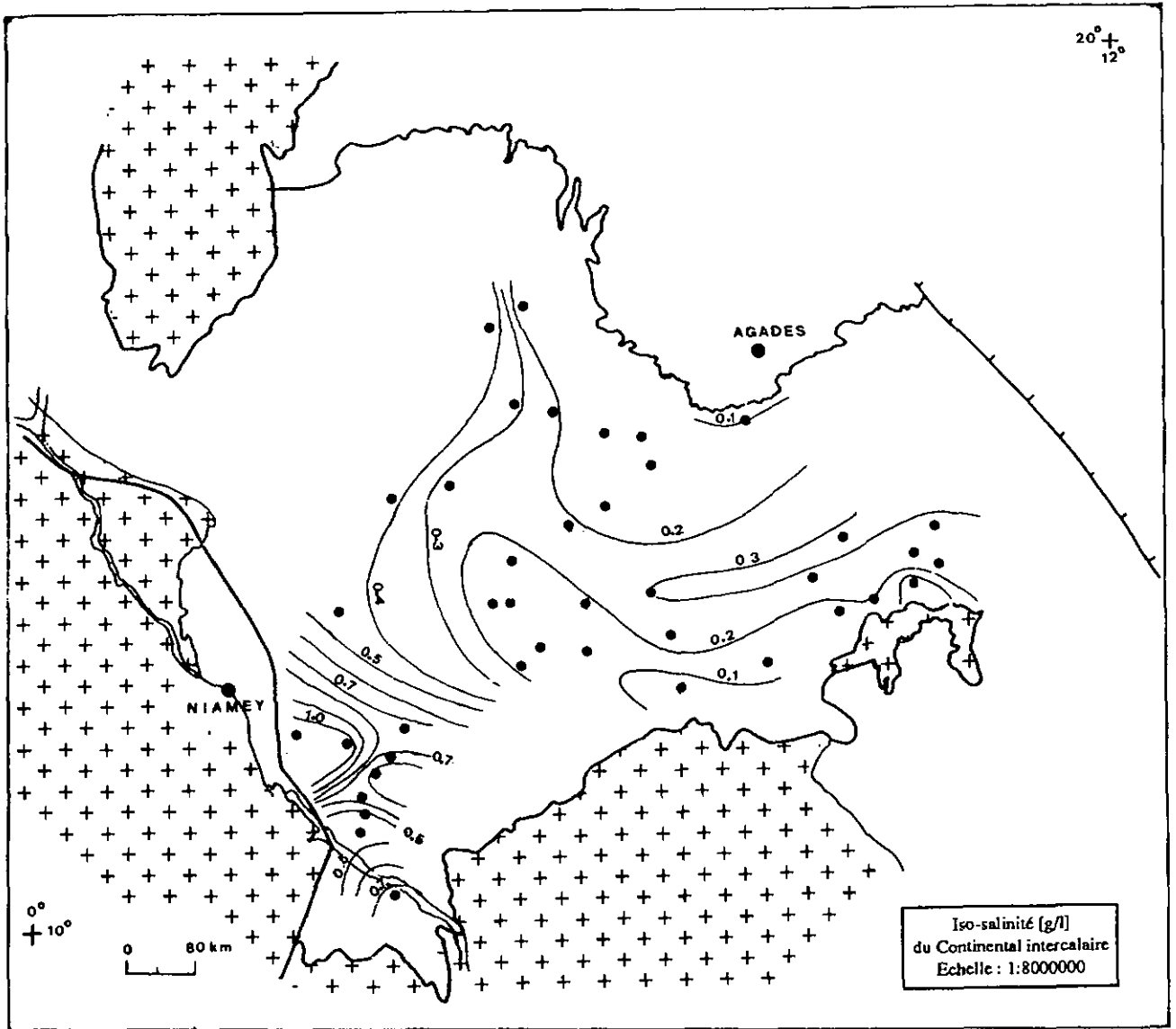


Figure 30 : Carte de salinité du Continental intercalaire CI.

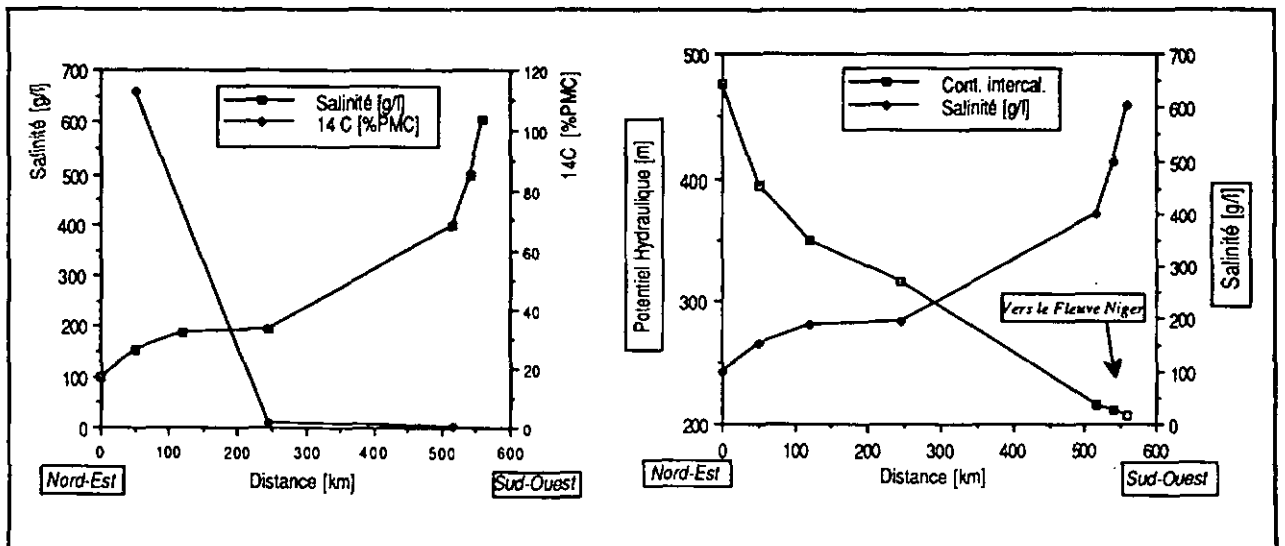


Figure 31 : Evolution du potentiel hydraulique, de la salinité et du  $^{14}\text{C}$  du nord-est au sud-ouest dans le CI.

## 4.9. Continental terminal 1 CT1

Les cartes d'isohypses du mur et du toit des réservoirs du CT ainsi que leur piézométrie, sont tirées des travaux Boeckh [1965] revues par [Bonnier, 1990] restreints au territoire nigérien. Nous avons intégré ces données en considérant l'extension totale de chaque réservoir excepté au Mali pour leur utilisation à l'une des prochaines étapes de notre travail.

### 4.9.1. Piézométrie

L'aquifère est à nappe captive sauf dans sa partie périphérique. Le module d'espacement des isopièzes décroît de NE vers le SW (annexe 15). On note une décroissance des isopièzes dans le même sens. Le gradient hydraulique est de  $4 \times 10^{-4}$ . La partie ouest de la discontinuité sédimentologique est caractérisée par un dôme piézométrique allongé selon une direction NW-SE. Ce dôme semble être lié à la suture panafricaine. L'aquifère est à nappe divergente. Les principaux axes d'écoulement sont orientés NE-SW et NW-SE.

### 4.9.2. Paramètres hydrodynamiques

Les valeurs de la transmissivité varient de  $1 \times 10^{-4}$  à  $1 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ . Le débit spécifique varie de 1 à  $4 \text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ .

### 4.9.3. Hydrochimie

Les eaux sont en général très douces [0.5g/l] sauf à l'ouest de la discontinuité [1.4g/l] dû à une alimentation *per ascencum*. Au nord, les eaux sont chlorurées sulfatées ou bicarbonatées sodiques ; au sud, elles sont bicarbonatées sodiques.

## 4.10. Aquifère du CT2

### 4.10.1. Piézométrie

L'aquifère est à nappe captive. Les isopièzes montrent une décroissance générale du nord vers le sud (annexe 15). Le module d'espacement des isopièzes a tendance à croître du nord vers le sud. L'aquifère est à nappe radiale convergente. Les principaux axes de drainage sont orientés NW-SE et NE-SW. Leurs gradients hydrauliques respectifs sont de  $1.2 \times 10^{-4}$  et  $2 \times 10^{-4}$ . Dans la partie SE de l'aquifère, on note l'existence d'un dôme piézométrique allongé selon une direction NNE-SSW.

### 4.10.2. Paramètres hydrodynamiques

Les valeurs de la transmissivité varient de  $10^{-3}$  à  $10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ , celles du débit spécifique de 4 à  $12 \text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ .

### 4.10.3. Hydrochimie

Les eaux sont douces (salinité moyenne de 0.4g/l) sauf dans la partie occidentale du réservoir où la salinité atteint 1.2g/l. Les eaux sont bicarbonatées sodiques et magnésiennes.

## 4.11. Aquifère du CT3

### 4.11.1. Piézométrie

L'aquifère est à nappe libre. Les isopièzes décroissent du nord vers le sud (annexe 15). L'aquifère est à nappe radiale convergente dont les principaux axes de drainage sont orientés NW-SE et NE-SW. Leurs gradients hydrauliques respectifs sont de  $2 \times 10^{-4}$  et  $3.2 \times 10^{-4}$ . On remarque l'existence de trois dômes piézométriques allongés au SW, au centre et au SE de l'aquifère. Le premier est en relation à la suture panafricaine ; les deux autres sont à l'aplomb des dallois.

### 4.11.2. paramètres hydrodynamiques

Les valeurs de la transmissivité sont comprises entre  $1 \times 10^{-3}$  et  $1 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ . Le débit spécifique varie de 4 à  $15 \text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ .

### 4.11.3. Hydrochimie

Les eaux sont en général douces (salinité  $< 0.4 \text{g}/\text{l}$ ). Cependant, dans le centre et au SW de l'aquifère, les eaux sont très minéralisées [ $1 \text{g}/\text{l}$ ]. Elles ont un faciès bicarbonaté calcique.

## 4.12. Aquifères superficiels

Ce sont les réservoirs alluvionnaires logés dans les cuvettes des vallées quaternaires d'oueds. Ces cuvettes sont souvent isolées entre elles par des seuils ou "verous" qui font office de barrage naturel [Zoreik, 1986]. Cette particularité confère à l'aquifère un caractère discontinu dans l'ensemble de la vallée. L'épaisseur des alluvions varie de 10 à 35m dans les massifs cristallins ; ces alluvions reposent sur un bed-rock. Celui-ci, profondément altéré et fissuré sur une trentaine de mètres le long des lits d'oueds, est caractérisé le plus souvent par une perméabilité aussi élevée que celle des alluvions [Benabderrahmane et al., 1983 ; Dodo & Bouzelboudjen, 1990]. Nous présentons un aperçu des caractéristiques de quelques réservoirs alluvionnaires (tabl. 14).

Oueds	Tamanrasset à Tamanrasset	Téloua à Agadès	Dalol Maouri	Maggia (Tadiss)	Goulbi N Maradi à Maradi
Epaisseur des alluvions (m)	15	35	>21	15 - 20	> 45
Hauteur mouillée (m)	5 - 10	12 - 30	8	-	40
Transmissivité $10^{-2} (\text{m}^2/\text{s})$	1.6 - 2.3	0.5 - 5	0.9 - 1.4	0.3 - 1	40
Débit spécifique ( $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ )	-	-	10	-	1 - 24

Tableau 14 : Caractéristiques physiques et hydrodynamiques de l'aquifère du Quaternaire.

Les eaux sont douces (0.03 à 0.1g/l de salinité) ; les activités en Tritium sont comprises entre 20 et 50UT [Joseph, 1990]. Les teneurs en  $^{14}\text{C}$  atteignent des valeurs de 130%PMC.

La plupart de ces oueds prennent naissance dans les massifs en empruntant le tracé des principales failles qui les affectent : NS dans le Hoggar, N30 et N70 à N90 dans l'Aïr (fig. 15). Par exemple, certaines failles, notamment les dernières, sont le siège de transfert de débit significatif vers les aquifères alluvionnaires [Dodo, 1986 ; 1989]. Des eaux hyperthermes (60°C) et très minéralisées (1.2g/l de salinité) ont été enregistrées dans des sources issues de ces failles de l'Aïr [Joseph & Aranyossy, 1990 ; Joseph, 1990].

L'écoulement superficiel des oueds contribue à la recharge du réservoir. Cependant, cette recharge est compromise car sujette aux aléas climatiques. La variation des réserves dépend de la durée des crues et de la hauteur de la lame d'eau [Dodo & Bouzelboudjen, 1990]. Ces réserves représentent les principales ressources en eau potable de certaines agglomérations (Agadès : 55'000hab ; Tamanrasset : 40'000hab).

Les réservoirs superficiels contribuent à alimenter les aquifères profonds dans leurs zones d'affleurement des grès (perte par infiltration) lors des crues exceptionnelles. C'est ainsi que des relevés piézométriques mensuels dans le périmètre minier d'Anou Araren (fig. 14) ont enregistré une remontée de 0.2 à 0.45m du niveau de la nappe du jurassique supérieur (crues d'Août 1988). Par ailleurs, 1 à 2mm/an des eaux du lit du goulbi de Maradi s'infiltrent dans l'aquifère du CI [Bernert & Nguyen Quang Trac, 1978].

A ce stade de réflexion, il nous paraît important d'essayer de définir le type de relation(s) hydraulique(s) entre les aquifères depuis le Cambro-Ordovicien jusqu'au Quaternaire.

#### 4.13. Relations hydrodynamiques entre les aquifères superposés paléozoïques et mésozoïques

Les différences de potentiel entre l'aquifère sous-jacent et celui qui le surmonte depuis le Cambro-Ordovicien jusqu'au Quaternaire ont été calculées. Nous nous sommes appuyés sur les forages pétroliers qui testent *individuellement* chaque réservoir traversé et sur les forages très proches exploitant une seule nappe.

Notre intention est de mettre en évidence d'éventuels échanges d'eau et de pressions pouvant s'établir entre deux nappes superposées séparées par des formations semi-perméables.

##### 4.13.1. Nappes du Cambro-Ordovicien et du Dévonien inférieur

Dans l'extrême partie NE, les différences de potentiel sont négatives (jusqu'à -10m) ; elles s'annulent plus au SW et deviennent positives (+4.70m) dans la majeure partie de l'aquifère du Dévonien inférieur. Celui-ci est pratiquement alimenté, à travers la formation argileuse du Gothlandien, par la nappe cambro-ordovicienne sauf dans l'extrême NE.

Un ordre de grandeur du débit de percolation verticale résultant de ces échanges peut être estimé par la formule suivante [Astié et al., 1967 ; Emsellem, 1967 ; Marty, 1967 ; Coffinier, 1980] :

$$Q = K \frac{D_p}{e} S$$

avec :

K = perméabilité verticale moyenne de la formation peu perméable [m/s]

$D_p$  = différence de potentiel entre les deux nappes communicantes [m]

$e$  = épaisseur de la formation peu perméable [m]

$S$  = surface considérée de l'aquifère principal [km<sup>2</sup>]

Le débit par unité de surface s'exprime par :

$$Q = K \frac{D_p}{e}$$

Si  $K = 10^{-6}$ m/s,  $e = 34$ m, le débit varie du nord vers le sud respectivement de  $3 \times 10^{-3}$  à  $4 \times 10^{-4}$ l/s/km<sup>2</sup>.

#### 4.13.2. Nappes du Dévonien Inférieur et du Viséen Inférieur

Dans tout le réservoir du Viséen inférieur, les différences de potentiel sont positives ; elles sont comprises entre +25m au nord et +5m au sud. Le Dévonien alimente partout le réservoir du Viséen inférieur.

La formation semi-perméable entre les deux réservoirs est constituée de la série argileuse et grès très fins à ciment argileux du Dévonien moyen et supérieur. Sa perméabilité est de  $2.5 \times 10^{-5}$ m/s. Son épaisseur varie du nord vers le sud respectivement de 122 à 48m avec un maximum de 136m au centre du synclinal, soit une moyenne de 100m. Le débit de percolation varie de 5 à  $3 \times 10^{-3}$ l/s/km<sup>2</sup> respectivement du nord au sud.

#### 4.13.3. Nappes du Viséen Inférieur et du Namurien supérieur

La carte a été établie sur la base des forages proches dans le périmètre minier d'Arlit, d'un forage pétrolier au centre du bassin et des points d'intersection des isopièzes.

Les différences de potentiel sont partout positives ; elles varient de +25m à l'est à +3m au centre du bassin. L'aquifère du Namurien supérieur est alimenté par le réservoir du Viséen inférieur.

La formation semi-perméable est composée d'argiles franches et l'aquitard du Namurien inférieur. Cet ensemble a une puissance moyenne de 104m et une perméabilité moyenne de  $1.6 \times 10^{-6}$ m/s. Pour une différence de potentiel moyenne de +14m, le débit de percolation est de l'ordre de  $2.2 \times 10^{-3}$  l/s/km<sup>2</sup>.

#### 4.13.4. Nappes du Namurien supérieur et du Trias-Jurassique Inférieur

Aucun forage profond ne capte le Namurien supérieur en traversant d'abord le réservoir Trias-Jurassique inférieur. Pour cette raison, les courbes d'égale différence de potentiel ont été établies uniquement sur la base des intersections des isopièzes des deux réservoirs. Les failles n'ont pas été prises en compte.

Les différences de potentiel sont partout positives ; elles sont comprises entre les valeurs de +5m au nord et +50m au sud soit une moyenne de +28m. L'aquifère du Namurien supérieur alimente partout le réservoir du Trias-Jurassique inférieur.

Les formations semi-perméables entre ces deux réservoirs sont les argiles du Namurien supérieur et toute la série permienne dans laquelle nous rappelons l'existence de l'aquitard du permien (Izégouande). Sa perméabilité moyenne est  $4 \times 10^{-6}$ m/s et sa puissance de 690m. Le débit de percolation moyen est de l'ordre de  $1.35 \times 10^{-3}$  l/s/km<sup>2</sup>.

#### 4.13.5. Nappes du Trias-Jurassique Inférieur et Jurassique supérieur

Les différences de potentiel sont partout positives ; elles varient de 0m au nord à +20m à l'ouest, soit une moyenne de +10m. Le réservoir du Jurassique supérieur est alimenté par la nappe sous-jacente du Trias-Jurassique inférieur.

Les argiles d'Abinky séparant les deux réservoirs, sont puissantes de 80m. Leur perméabilité est en moyenne de  $10^{-6}$ m/s. Le débit de percolation est de l'ordre de  $1.3 \times 10^{-3}$  l/s/km<sup>2</sup>.

#### 4.13.6. Nappes du Continental Intercalaire CI et CT1

Nous avons établi la carte par la confrontation des potentiels du CT1 de ceux du CI. Les différences de potentiel sont partout positives (jusqu'à +30m) sauf dans la partie SE où elles s'annulent et deviennent négatives. En d'autres termes, le réservoir du CT1 est alimenté par la nappe sous-jacente du CI sauf dans la partie méridionale où les deux nappes sont confondues voire une alimentation du CI par le CT1.

#### 4.13.7. Nappes du CT1 et du CT2

La confrontation du potentiel du CT2 à celles du CT1 donne des différences de potentiel positives partout dans le réservoir du CT2. Elles varient de +10 à +40m. Le réservoir est alimenté par la nappe du CT1.

#### 4.13.8. Nappes du CT2 et du CT3

Les différences de potentiels sont partout négatives (jusqu'à -20m) sauf quelques zones au nord (+10m), au SW (+10m) et au SE (+5m). Les deux réservoirs s'alimentent mutuellement selon les secteurs.

#### 4.13.9. Conclusion

Les cartes de différences de potentiel dans le bassin occidental du Niger montrent que toutes les nappes depuis le Cambro-Ordovicien jusqu'au Quaternaire, sont en communication entre elles. Les réservoirs sous-jacents alimentent la nappe supérieure au travers des formations argileuses (fig. 32).

Si à l'échelle d'un bloc élémentaire, une formation argileuse peut être considérée comme imperméable, en revanche, à l'échelle d'un bassin, des débits significatifs transitent au travers de ces formations [Emsellem, 1967]. C'est le phénomène de drainance [Albinet & Cottez, 1966 ; Forkasiewicz et Margat, 1966 ; Margat, 1966 ; Marty, 1966 ; Emsellem, 1967 ; Anon/UNESCO, 1972 ; Ledoux, 1982 ; Dieng, 1985]. Ainsi, le débit entrant varie d'amont en aval dans de tels réservoirs captifs ; une partie est reprise par la drainance.

Au terme de notre travail d'identification des aquifères et du type de relation entre eux, nous allons essayer de définir leurs conditions aux limites hydrogéologiques.

### 4.14. Essai de définition des conditions aux limites hydrogéologiques du bassin du Niger

#### 4.14.1. Le Cambro-Ordovicien

La limite intérieure est à flux nul car il repose sur le socle cristallin du Hoggar et de Aïr. Latéralement, il reçoit un apport de l'ordre de 150l/s par les eaux des crues d'oueds du Hoggar [Gribi, 1992], soit environ 0.03l/s/km<sup>2</sup>.

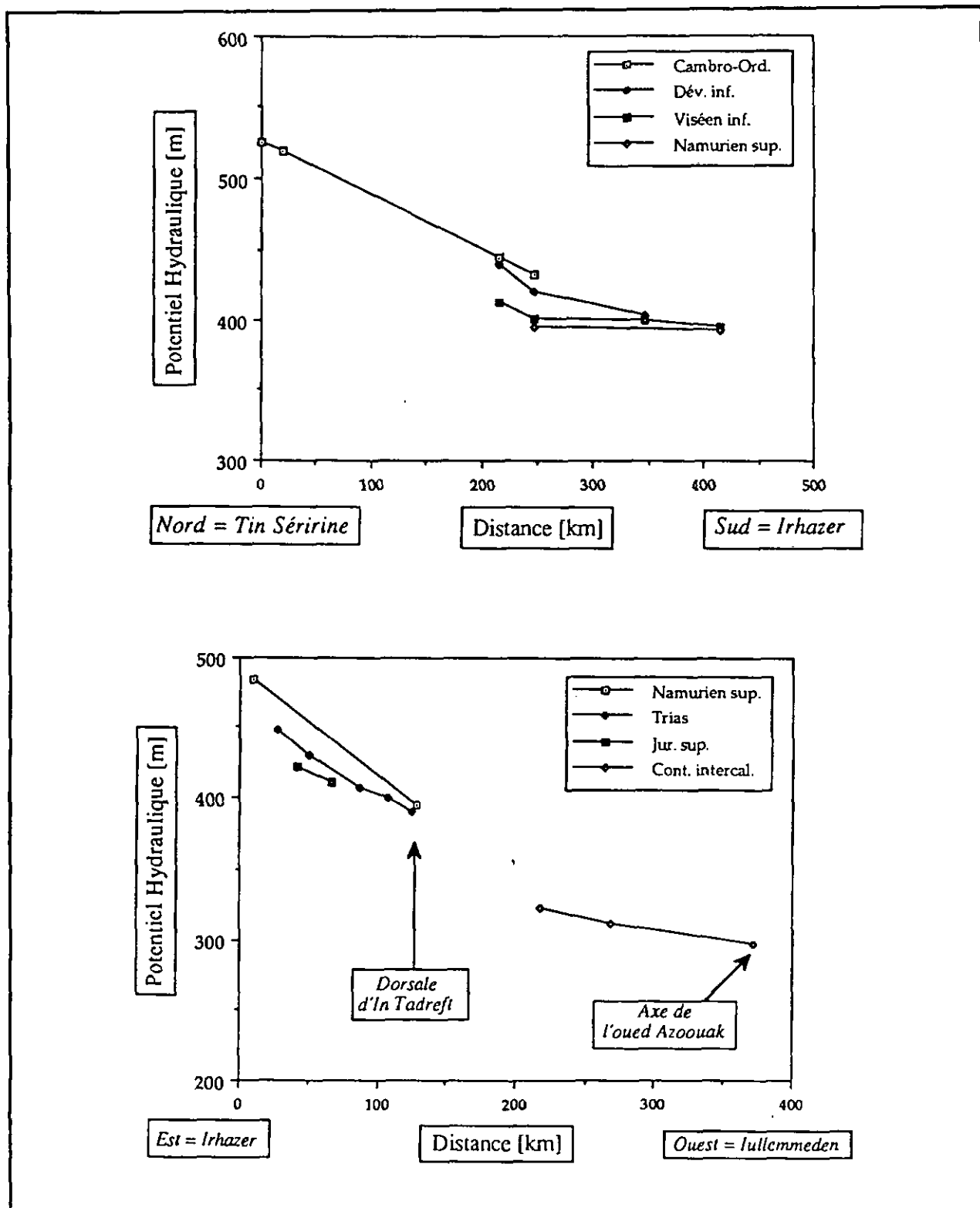


Figure 32 : Différences de potentiel entre les aquifères paléozoïques et mésozoïques du Tin Séririne et Irhazer.

#### 4.14.2. Le Dévonien Intérieur

Sa limite inférieure est à flux imposé puisque alimenté par drainage par le Cambro-Ordovicien. Au sud, il repose sur le socle.

#### 4.14.3. Le Viséen inférieur

Au nord, sa limite est à flux imposé ; il est alimenté par drainance par le Dévonien inférieur. Au sud, il repose sur le socle.

#### 4.14.4. Le Namurien supérieur

La limite inférieure est à condition de flux. Il est alimenté par le réservoir du Viséen inférieur au travers l'aquitard du Namurien inférieur.

#### 4.14.5. Aquifère du Trias-Jurassique Inférieur

Il a une limite inférieure à flux imposé. Plus au sud où il fait corps avec le Viséen inférieur, ses conditions aux limites hydrogéologiques restent à définir ; elles seront abordées dans le prochain chapitre.

#### 4.14.6. Le Jurassique supérieur

Il présente une limite inférieure à condition de flux imposé (alimentation par drainance par les eaux du Trias-Jurassique inférieur).

#### 4.14.7. L'aquifère du Continental Intercalaire CI

Sa limite inférieure à condition de flux nul est située à l'extrême NE où il repose sur l'Aïr, au sud sur le Damagaram-Mounio et le bouclier nigérian et enfin, au SW par la suture panafricaine et le socle précambrien du Man. Au NE et au nord où le réservoir repose respectivement sur les argilites de l'Irhazer et les formations paléozoïques, sa limite inférieure est à flux non nul. A l'ouest, le graben de Gao qui met en communication hydraulique le bassin du Niger à celui de Taoudenni, est à condition de flux. Sa limite supérieure, zone d'affleurement des grès (nappe libre) est à condition de potentiel. Ses exutoires principaux sont le fleuve Niger à l'ouest et le lac Tchad à l'est.

#### 4.14.8. Les aquifères du Continental Terminal CT

La limite supérieure des trois réservoirs (CT1, CT2, CT3) est à condition de potentiel constant sauf le CT3, à nappe libre, recevant les eaux d'infiltration des dallois (dômes piézométriques) ; d'autre part, sa limite orientale est caractérisée par un "biseau sec", limite à flux nul à l'instant donné. Les trois réservoirs, développés dans le bassin de Taoudenni, ont une limite latérale à flux non nul. Au sud, le fleuve drainant les eaux des aquifères du CT, est l'exutoire principal à condition de potentiel.

#### 4.14.9. Aquifères quaternaires

Les oueds issus des massifs alimentent les réservoirs profonds par infiltration de leurs eaux de crues exceptionnelles (fig. 12 ; annexe 1).

*En général*, dans les parties affleurantes (à nappe libre) de ces réservoirs, l'apport est d'au moins 1.5 mm/an. Par ailleurs, la forte densité des forages dans les réservoirs du Cambro-Ordovicien et du Trias-Jurassique a permis de tracer le "biseau sec" considéré comme une limite à flux nul à l'instant choisi [Margat, 1991].

Un des moyens privilégiés pour résumer les principales conclusions d'identification des aquifères est la carte hydrogéologique. Un des buts importants qu'elle s'est assignée est la représentation des systèmes d'écoulement [Király, 1978].

#### 4.15. Carte hydrogéologique du bassin de l'rhazer au 1:500'000 (Aquifères des grès d'Agadès)

La complexité structuro-lithologique du bassin et les conditions hydrogéologiques de ses formations en milieu fracturé aride impliquent un choix et un classement adéquats des nombreuses données hydrogéologiques (fig. 33) pour une représentation cartographique intelligible à l'échelle 1:500 000 (fig. 34). La légende s'appuie sur celle de l'Unesco [Struckmeier et al., 1983] et les dernières recommandations du PCHIA sur l'élaboration des cartes hydrogéologiques (fig. 35). Elle se propose de présenter certaines spécificités dans le bassin [Dodo et al., 1991].

La distinction continu-discontinu est relative à l'échelle. Il ne s'agit pas de l'échelle microscopique à laquelle tout milieu est discontinu, ni de l'échelle macroscopique régionale à laquelle le "volume élémentaire représentatif" (VER) d'un aquifère fissuré peut néanmoins être petit, mais de l'échelle proche de celle des ouvrages de captage, métrique à décimétrique [Margat, 1991].

##### 4.15.1. Aquifères continus

Ce sont les roches à porosité interstitielle représentées par les aquifères du bassin sédimentaire et les aquifères des alluvions des vallées d'oueds. Le bassin sédimentaire regroupe les aquifères multicouches en général captifs et artésiens séparés entre eux par des formations non-aquifères (argiles) ou semi-perméables (grès argileux ou argile gréseuse); il représente les ressources en eau les plus importantes. Ils seront représentés en différentes gammes du Bleu.

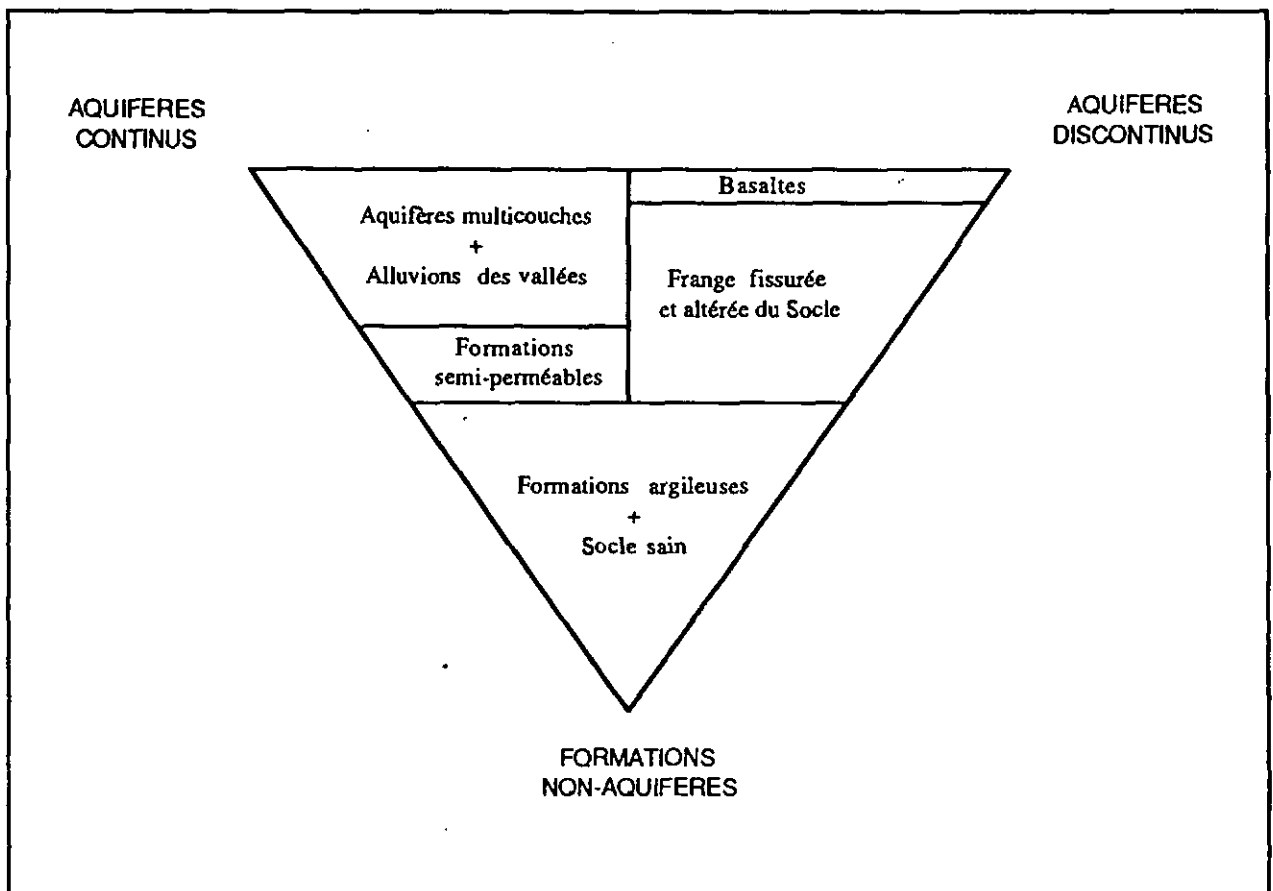


Figure 33 : Classification des formations géologiques selon leur nature et leurs comportements hydrogéologiques (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM, Nol-2, 1992).



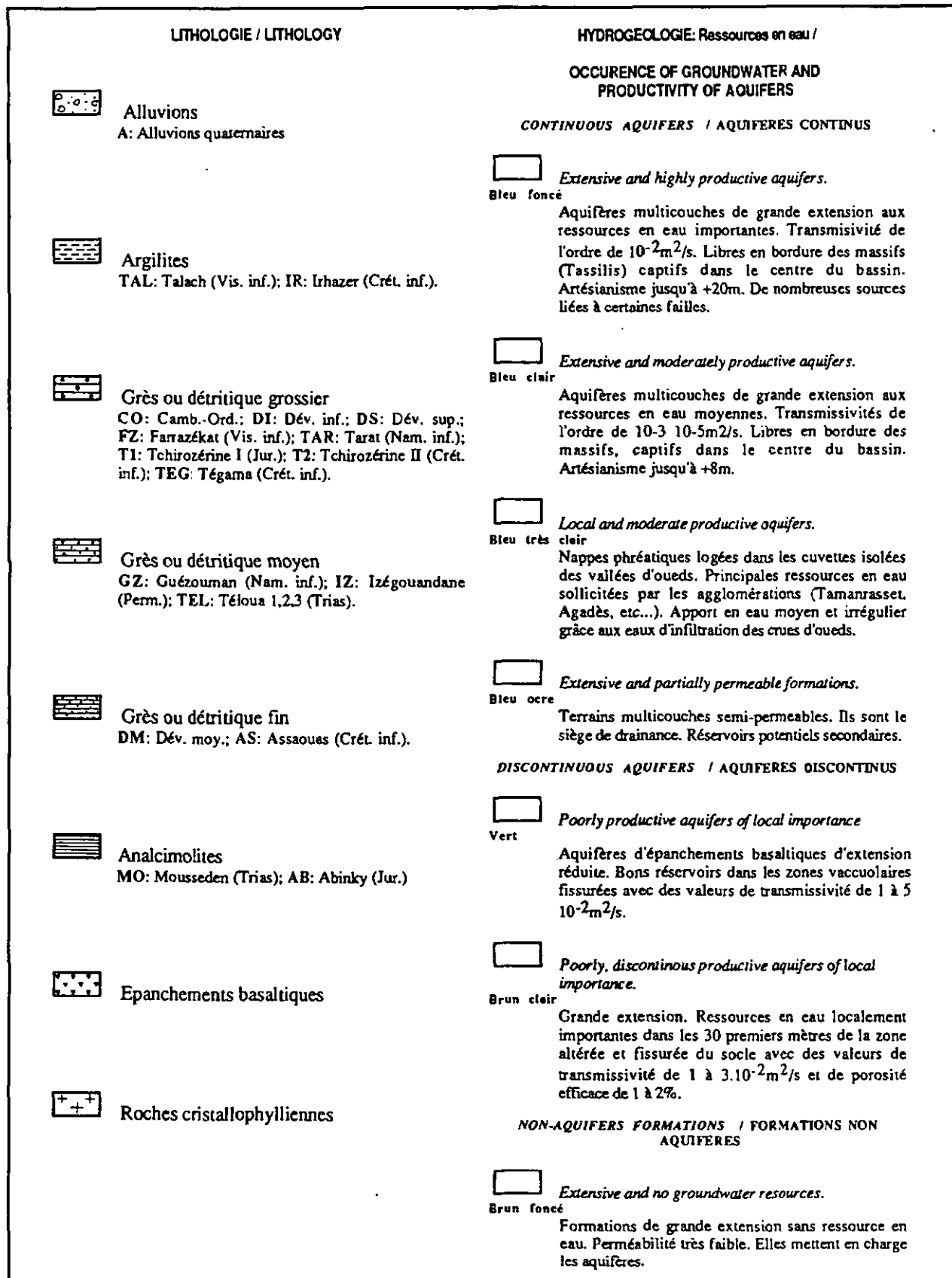


Figure 35 : Extrait de la légende de la carte hydrogéologique des aquifères du sous-bassin de l'Irhazer (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM, Nol-2, 1992).

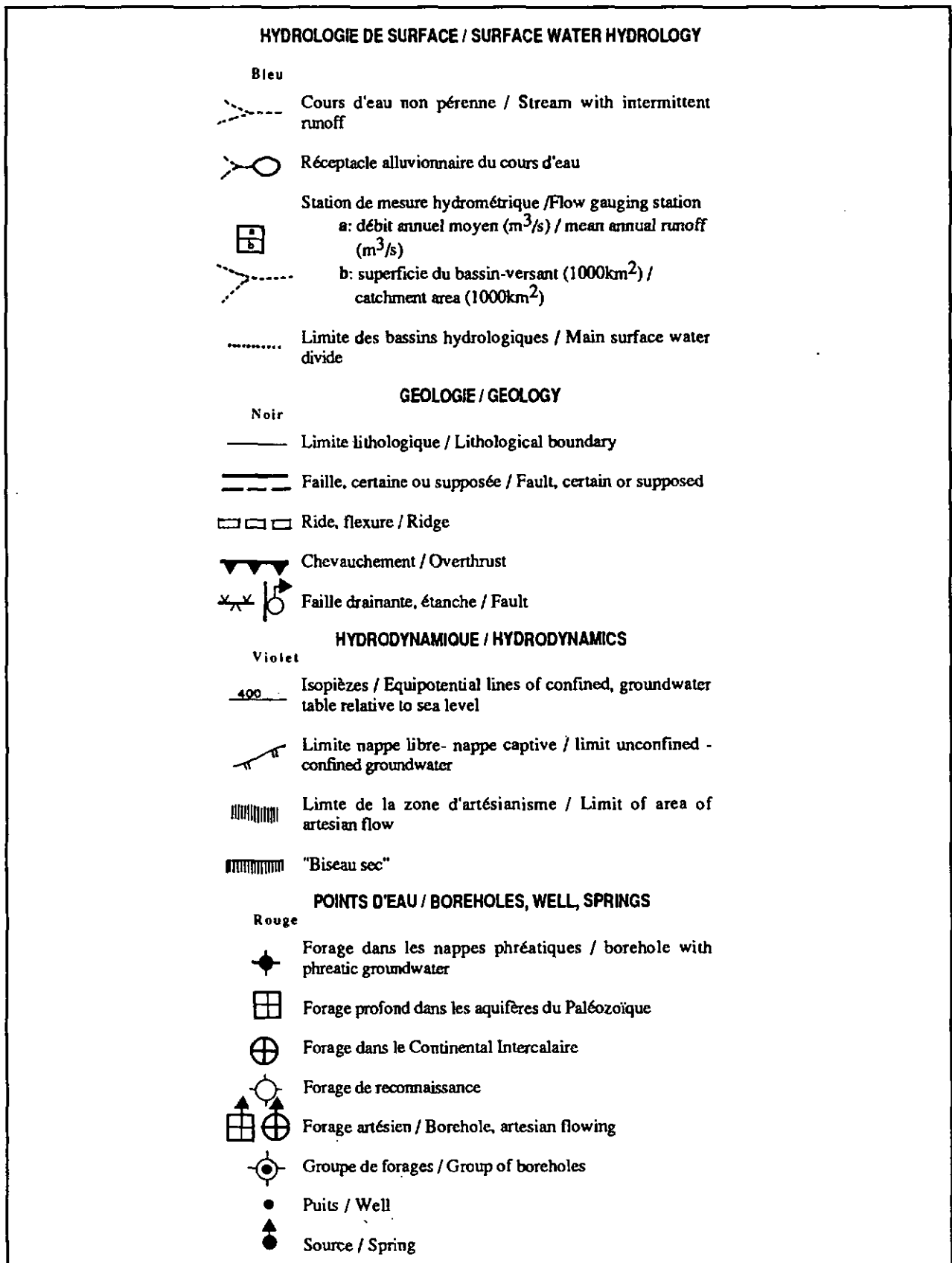


Figure 35 (suite) : Extrait de la légende de la carte hydrogéologique des aquifères du sous-bassin de l'Irhazer (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM, No1-2, 1992).

#### 4.15.2. Aquifères discontinus

Ils sont représentés principalement par les formations volcaniques à porosité vacuolaire souvent fissurées et par la frange altérée et fissurée du socle cristallin. Ils seront représentés en *Vert*. Ils intègrent, dans une certaine proportion, les grès très consolidés et fracturés des aquifères profonds du bassin et les aquifères alluvionnaires des vallées. Les aquifères profonds sont compartimentés par le jeu de systèmes de failles. Les aquifères alluvionnaires présentent une discontinuité spatiale à l'échelle de la vallée: le réservoir principal n'existe que dans les cuvettes séparées entre elles par des seuils ou des verrous.

#### 4.15.3. Formations semi-perméables

Ce sont les formations sédimentaires gréso-argileuses. Elles sont le siège de la drainance des eaux souterraines d'un aquifère profond à l'autre (sus-jacent en général). Elles seront représentées en *Bleu-Ocre* afin de regrouper la dualité porosité efficace et productivité faibles. Dans certains cas, elles peuvent constituer un réservoir potentiel secondaire (Izégouande, Guezouman).

#### 4.15.4. Formations non-aquifères

Elles regroupent les roches sédimentaires (argiles, Analcimolites) et les roches cristallines stériles à l'état sain. Elles seront représentées en *Brun Foncé*. Quant au socle, du fait de l'existence d'eaux dans les réseaux de failles, le *Brun Clair* lui sera attribué.

#### 4.15.5. Lithologie

Elle est essentiellement constituée d'alternances de formations gréseuses très consolidées et argileuses, marines épicontinentales et continentales allant du Cambrien au Crétacé inférieur, des alluvions quaternaires, des basaltes tertiaires et du socle cristallin indifférencié du Précambrien. La différenciation des formations gréseuses se base sur la variation granulométrique de la matrice. Pour les Analcimolites, roches volcano-sédimentaires, un figuré leur a été choisi. Ainsi, à chaque formation, seront attribués son figuré et des initiales.

#### 4.15.6. Points d'eau

Dans la perspective de représenter la troisième dimension sur la carte, une symbolisation particulière de ces forages a été choisie selon le nombre, l'âge et le type d'aquifère(s) capté(s) (fig. 36).

#### 4.15.7. Piézométrie

L'aquifère des grès d'Agadès qui représente le bassin de l'Irhazer, a été choisi pour illustrer l'étude hydrodynamique (fig. 27). La carte piézométrique sera enrichie par les principales directions d'écoulement, les gradients hydrauliques et les conditions aux limites hydrogéologiques.

#### 4.15.8. Hydrochimie

Les qualités chimiques de l'eau seront appréhendées par la distribution (spatiale) des valeurs de la salinité [en g/l]. Selon les données disponibles, des teneurs en isotopes ( $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ) et en gaz nobles ( $^4\text{He}$ ) seront situées ponctuellement.

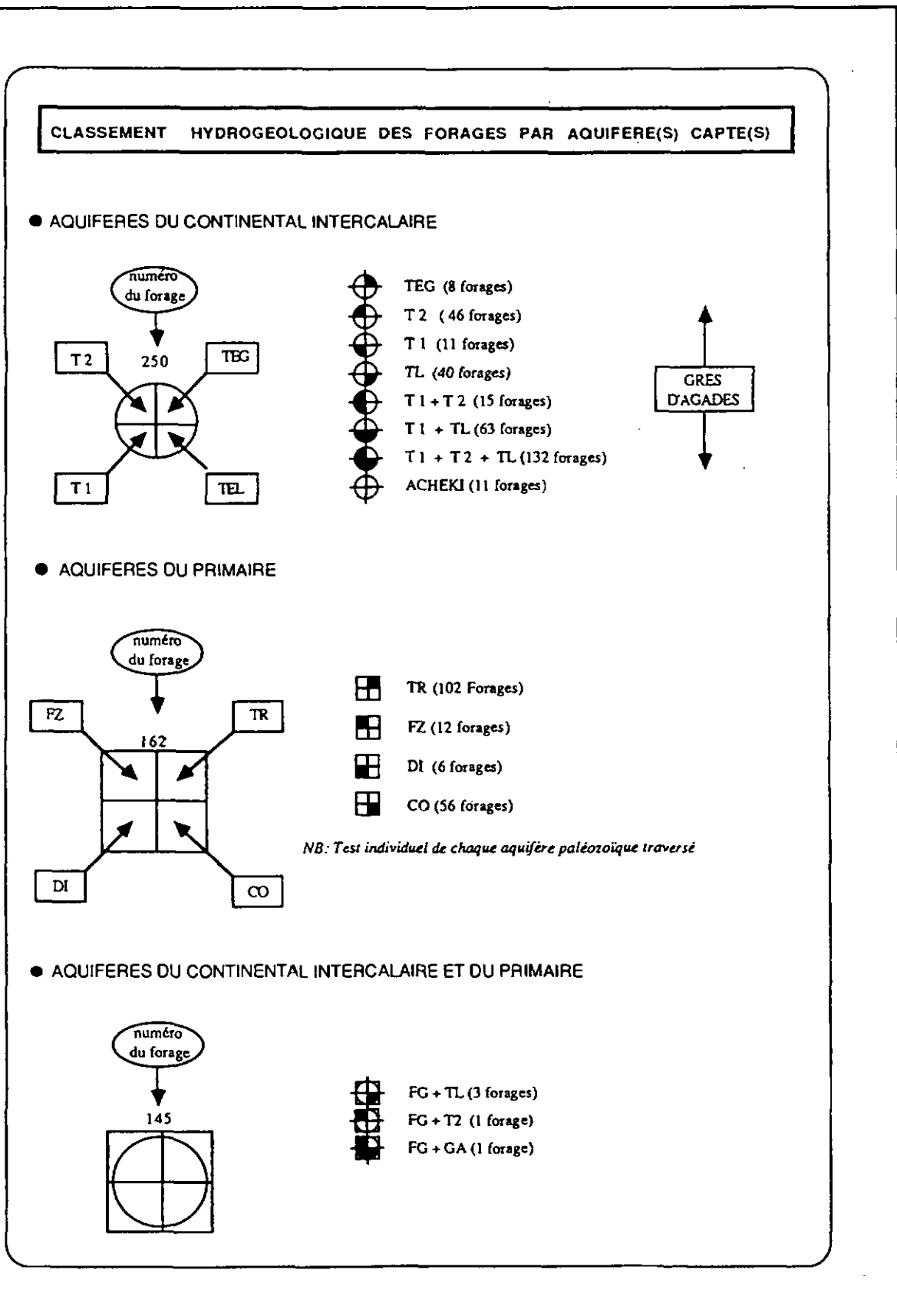


Figure 36 : Classement des points d'eau par aquifère(s) capté(s) (Dodo & Bouzelboudjen, BRGM, No1-2, 1992).

#### 4.15.9. Modèles conceptuels d'écoulement souterrain

Ils offrent un cadre idéal pour approcher la définition des conditions aux limites hydrogéologiques "raisonnables" [Tóth, 1962, 1963 ; Freeze & Witherspoon, 1966, 1967, 1968 ; Király, 1970, 1978, Bouzelboudjen, 1988], apprécier le degré d'interaction du Groupe des grès d'Agadès avec son environnement, et enfin, pour tenter de comprendre le fonctionnement des circulations profondes dans le bassin en échaffaudant des hypothèses conformes aux observations réelles.

#### 4.16. Conclusion

Les principales conclusions d'individualisation, de schématisation et de caractérisation de chaque aquifère dans le grand bassin du Niger, telles qu'elles ressortent de l'étude hydrodynamique, décrivent une continuité hydraulique entre les réservoirs au travers des formations semi-perméables.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter les circulations profondes dans le bassin du Niger à l'aide des modèles conceptuels d'écoulement.

# *Chapitre 5*

*Modèles Conceptuels  
d'Écoulement Souterrain dans  
le Bassin du Niger*

## Chapitre 5

# Modèles Conceptuels d'Écoulement Souterrain dans le Bassin du Niger

5.1. Modèles conceptuels d'écoulement souterrain .....	75
5.2. Circulations profondes dans le bassin du Niger Septentrional .....	77
5.2.1. Bassins de Tin Séririne et de l'Irhazer .....	77
5.2.2. Bassins de Tin Séririne et d'Iullemeden .....	77
5.3. Circulations profondes dans le bassin du Niger Central .....	77
5.3.1. Bassins de l'Irhazer et d'Iullemeden Est-Ouest .....	77
5.3.2. Bassins de l'Irhazer et d'Iullemeden Nord-Sud.....	79
5.3.2.1. Les écoulements souterrains selon Coupe NS .....	79
5.3.2.2. Les écoulements souterrains selon Coupe NS-NE-SW .....	79
5.4. Circulations profondes dans le bassin du Niger Occidental .....	82
5.5. Conclusion .....	82

Dans ce chapitre, nous présentons des modèles conceptuels d'écoulement souterrain en coupe (fig. 37). Ils offrent un cadre idéal pour approcher la définition des conditions aux limites hydrogéologiques des aquifères du Groupe des grès d'Agadès, apprécier le degré d'interaction avec son environnement, et enfin, pour tenter de comprendre le fonctionnement des circulations profondes dans le bassin en échaffaudant des hypothèses conformes aux observations réelles.

### 5.1. Modèles conceptuels d'écoulement souterrain

Notre travail d'identification a considéré uniquement selon le *plan horizontal* les écoulements souterrains dans les aquifères pris d'abord individuellement, puis comparés entre eux (drainance).

Dans la présente étape, nous considérons les écoulements selon le *plan vertical* qui consiste à schématiser la structure du bassin en regroupant les unités aquifères proprement dites et les écrans semi-perméables capacitifs. Dans cette structure où les variations de faciès s'accompagnent de variations importantes et discontinues de la perméabilité, les écoulements seront appréhendés en leur appliquant la règle de réfraction des lignes de courant et des équipotentielles au voisinage immédiat de la limite de deux couches [Hubbert, 1940 ; Tóth, 1962 ; 1963 ; 1978 ; Freeze & Witherspoon, 1966 ; 1967 ; 1968 ; Király, 1970 ; 1978 ; Bonnet, 1982 ; Bouzelboudjen, 1991] :

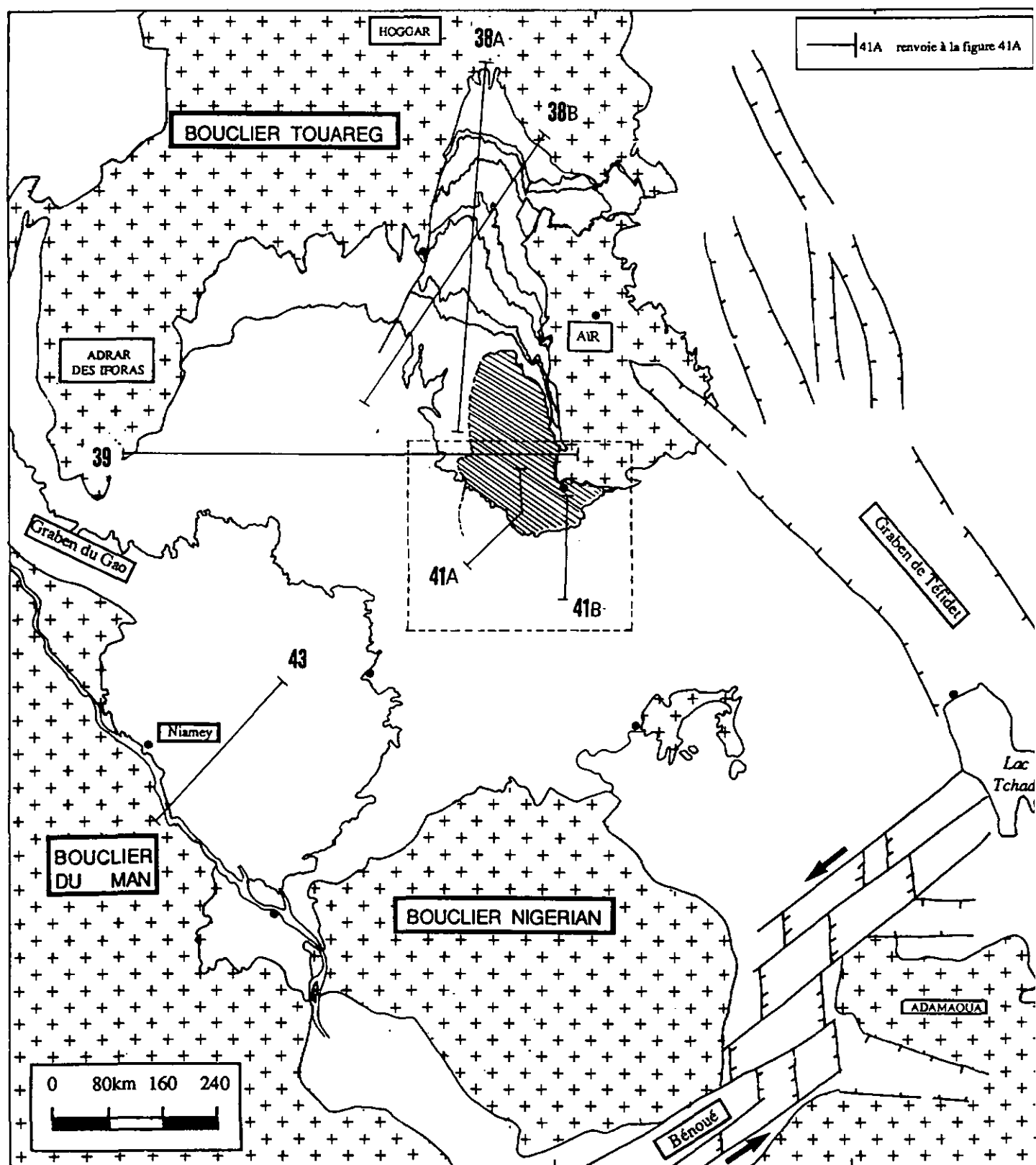


Figure 37 : Circulations profondes des eaux souterraines dans le bassin du Niger : tracé des coupes des modèles conceptuels d'écoulement établis pour l'essai de définition des relations hydrodynamiques entre les sous-bassins.

$$\frac{\text{tg } q_1}{\text{tg } q_2} = \frac{K_1}{K_2}$$

avec 1 = couche 1 et 2 = couche 2.

Les modèles conceptuels d'écoulement ne sont que la représentation verticale déduite des différentes cartes piézométriques présentées. Le choix des coupes est fonction du problème à résoudre et de la quantité et de la qualité des données disponibles (fig. 37).

Ces modèles, moyennant des hypothèses raisonnables, ont permis de proposer des configurations qui vont dans le sens des observations.

## 5.2. Circulations profondes dans le bassin du Niger Septentrional

### 5.2.1. Bassins de Tin Séririne et de l'Irhazer

Les forages 158, 159 et 161 sont des forages pétroliers dont chaque réservoir paléozoïque traversé a été testé individuellement.

Les écoulements dans les aquifères et les formations semi-perméables s'effectuent du nord (Tin Séririne) vers le sud (Irhazer), (fig. 38a). Les équipotentielles sont subverticales dans les réservoirs aquifères ; en revanche, elles sont très obliques dans les formations argileuses semi-perméables. Une ligne de courant "a" issue du réservoir du Cambro-Ordovicien, traverse les formations sus-jacentes jusqu'à l'aquifère du Namurien supérieur. Elle traduit d'une part l'alimentation des réservoirs du Namurien supérieur, Viséen inférieur et Dévonien inférieur par le Cambro-Ordovicien du Tin Séririne confirmant ainsi les différences de potentiel observées. D'autre part, elle montre le caractère variable du débit entrant d'amont en aval du réservoir du Cambro-Ordovicien ; en effet, une partie significative du débit entrant est reprise par la drainance vers les formations supérieures.

### 5.2.2. Bassins de Tin Séririne et d'Iullemeden

La partie sommitale des synclinaux est caractérisée par un système d'écoulement local (dont l'exutoire est une perte par évaporation), (fig. 38b). Les argiles crétacées de l'Irhazer, entre le Continental intercalaire CI et le Namurien supérieur, représentent l'exutoire (perte par évaporation) d'un système intermédiaire formé de l'ensemble des lignes de courant issues en partie de tous les réservoirs. Une autre partie de ces eaux alimente le réservoir du CI vers le sud-ouest constituant ainsi un écoulement régional.

## 5.3. Circulations profondes dans le bassin du Niger Central

### 5.3.1. Bassins de l'Irhazer et d'Iullemeden Est-Ouest

La surface piézométrique à droite de la figure correspond à celle de l'aquifère du Trias-Jurassique inférieur ; celle de gauche appartient au réservoir du CI (fig. 39). L'aquifère du Viséen inférieur n'a pas été pris en considération faute de forages qui le captent selon le tracé de la coupe.

La direction générale d'est vers l'ouest des écoulements dans les aquifères du Namurien supérieur et du Groupe des grès d'Agadès est bien exprimée comme dans les cartes piézométriques.

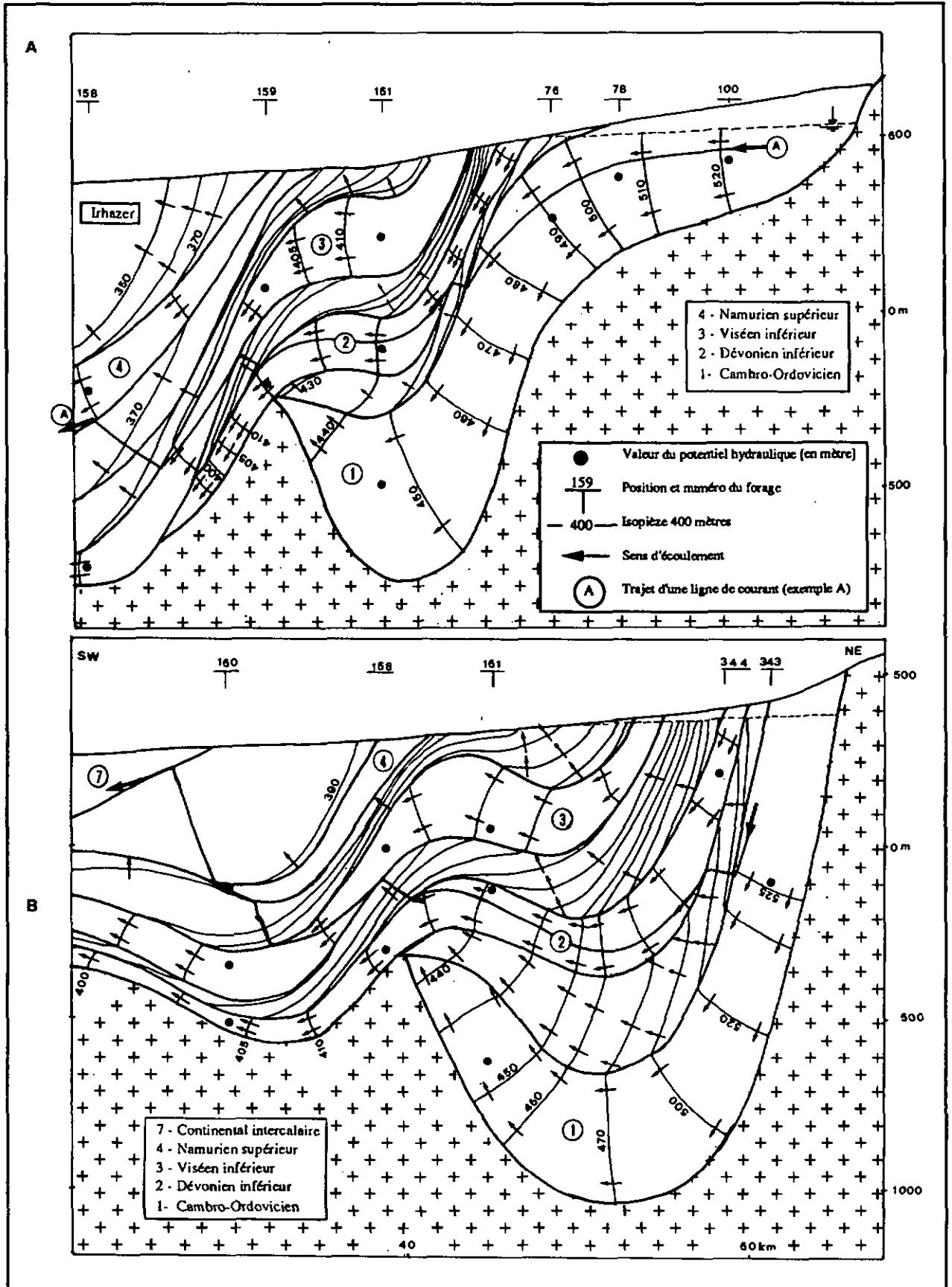


Figure 38 : Modèle conceptuel d'écoulement en coupe NS (A) et NE-SW (B) : A - relations hydrodynamiques entre les sous-bassins de Tin Sérine et d'Irhazer. B - relations entre les sous-bassins de Tin Sérine et d'Iullemeden.

Le réservoir du Namurien supérieur alimente en partie les aquifères du Groupe des grès d'Agadès et en partie le CI à l'ouest de la dorsale d'In Tadreit. L'aquifère du Trias-Jurassique inférieur alimente en partie le Jurassique supérieur et en partie le CI à travers les argiles de l'Irhazer malgré la dorsale d'In Tadreit qui représente sa limite sédimentologique.

Dans le sous-bassin de l'Irhazer, les eaux convergent dans la majeure partie vers l'aire d'artésianisme.

Le grand réservoir du CI reçoit ainsi d'est les eaux des aquifères de l'Irhazer. Les eaux convergent vers le lit mineur de l'oued Azaouak. Celui-ci draine la nappe du CI vers le sud en direction du fleuve.

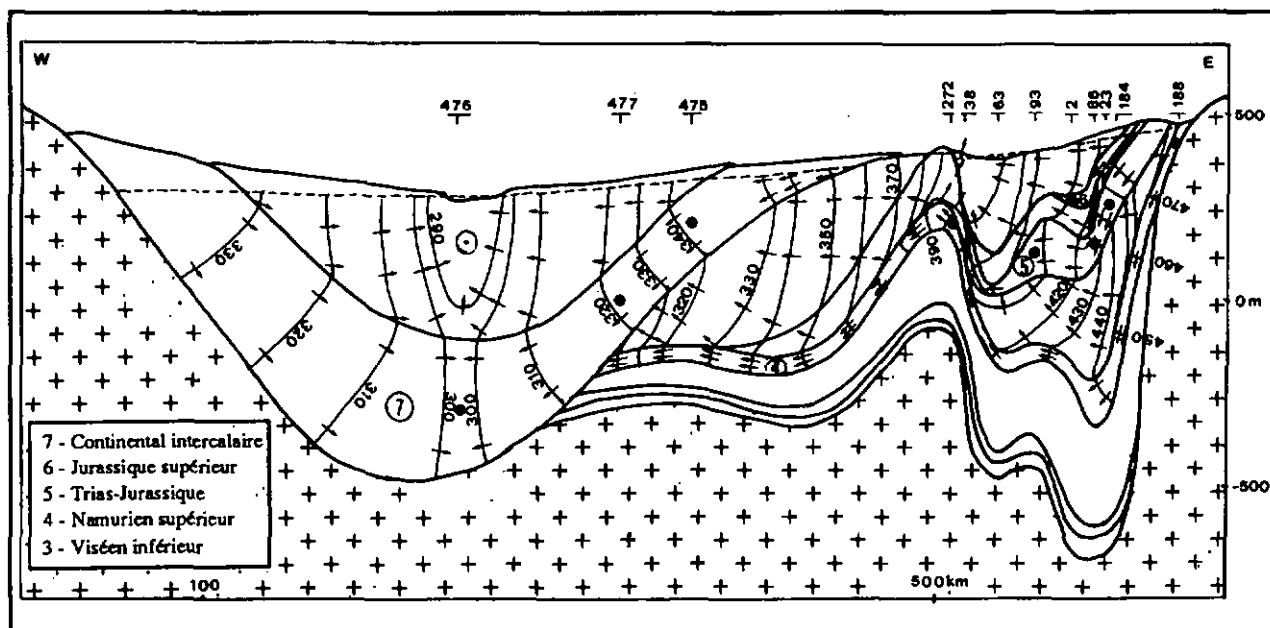


Figure 39 : Modèle conceptuel d'écoulement en coupe EW : relations hydrodynamiques entre les sous-bassins d'Irhazer et d'Iullemeden.

### 5.3.2. Bassins de l'Irhazer et d'Iullemeden Nord-Sud

Nous allons essayer de définir les conditions aux limites hydrogéologiques des aquifères du Groupe des grès d'Agadès sur la base de la distribution de leur potentiel et de leur salinité ainsi que celles du Continental intercalaire CI. Rappelons que leur limite lithologique méridionale est inconnue. Nous avons établi deux coupes NS et NS-NE-SW.

#### 5.3.2.1. LES ECOULEMENTS SOUTERRAINS SELON COUPE NS

Les eaux issues d'un dôme piézométrique s'écoulent en partie vers le sud dans le CI, en partie vers le réservoir du Groupe des grès d'Agadès (fig. 40a). Un écoulement local présente un exutoire caractérisé par les sources au pied de la falaise de Tiguidit. Le flux entrant est de l'ordre de 0.1 l/s/km<sup>2</sup>.

#### 5.3.2.2. LES ECOULEMENTS SOUTERRAINS SELON COUPE NS-NE-SW

Dans le tronçon NS, au sein du Groupe des grès d'Agadès, les eaux s'écoulent en partie vers le sud, en partie vers le nord où l'exutoire est la source de Teguidda N'Adrar. Celle-ci appartient à l'aire d'artésianisme (fig. 40b).

Le tronçon NE-SW est semblable au précédent schéma d'écoulement NS. Le Groupe des grès d'Agadès est alimenté par le CI.

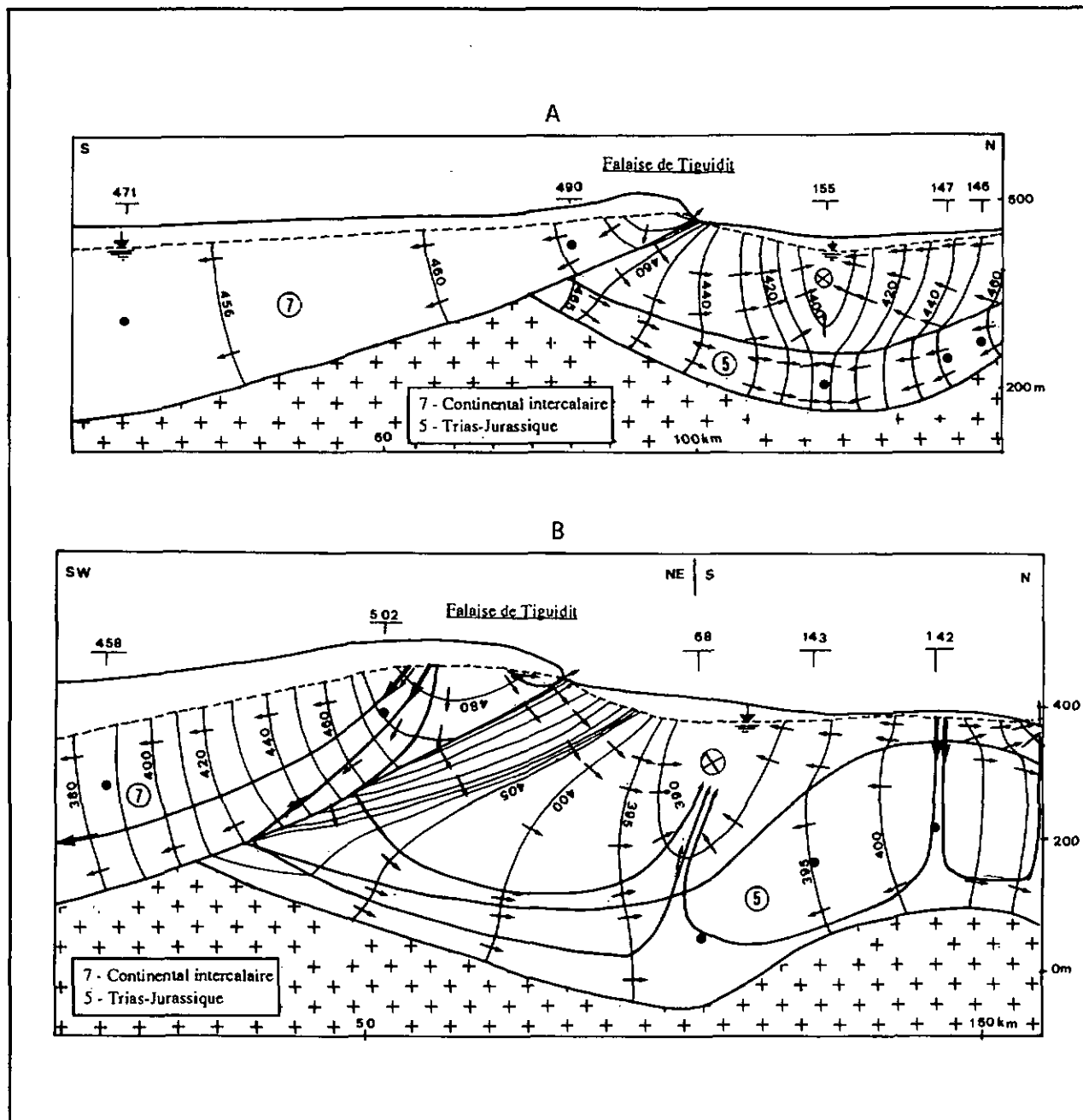


Figure 40 : Modèles conceptuels d'écoulement souterrains en coupe nord-sud (A) et nord-sud - nord-est-sud-ouest (B) : relations entre les sous-bassins d'Irhazer et d'Iullemeden.

Les eaux issues des deux réservoirs convergent au nord de la falaise pour s'écouler d'est vers l'ouest.

Le schéma d'écoulement que nous proposons montre un écoulement général NE-SW dans le Groupe des grès d'Agadès et la limite méridionale souterraine de celui-ci transgressé par l'aquifère du CI.

En conclusion, à travers les schémas d'écoulement proposés, la limite inférieure du CI est à condition de flux. Au nord et au nord-est, il est alimenté par les eaux des réservoirs paléozoïques de Tin Sérine et mésozoïques de l'Irhazer. Au sud, c'est le CI qui alimente le réservoir du Groupe des grès d'Agadès (fig. 41).

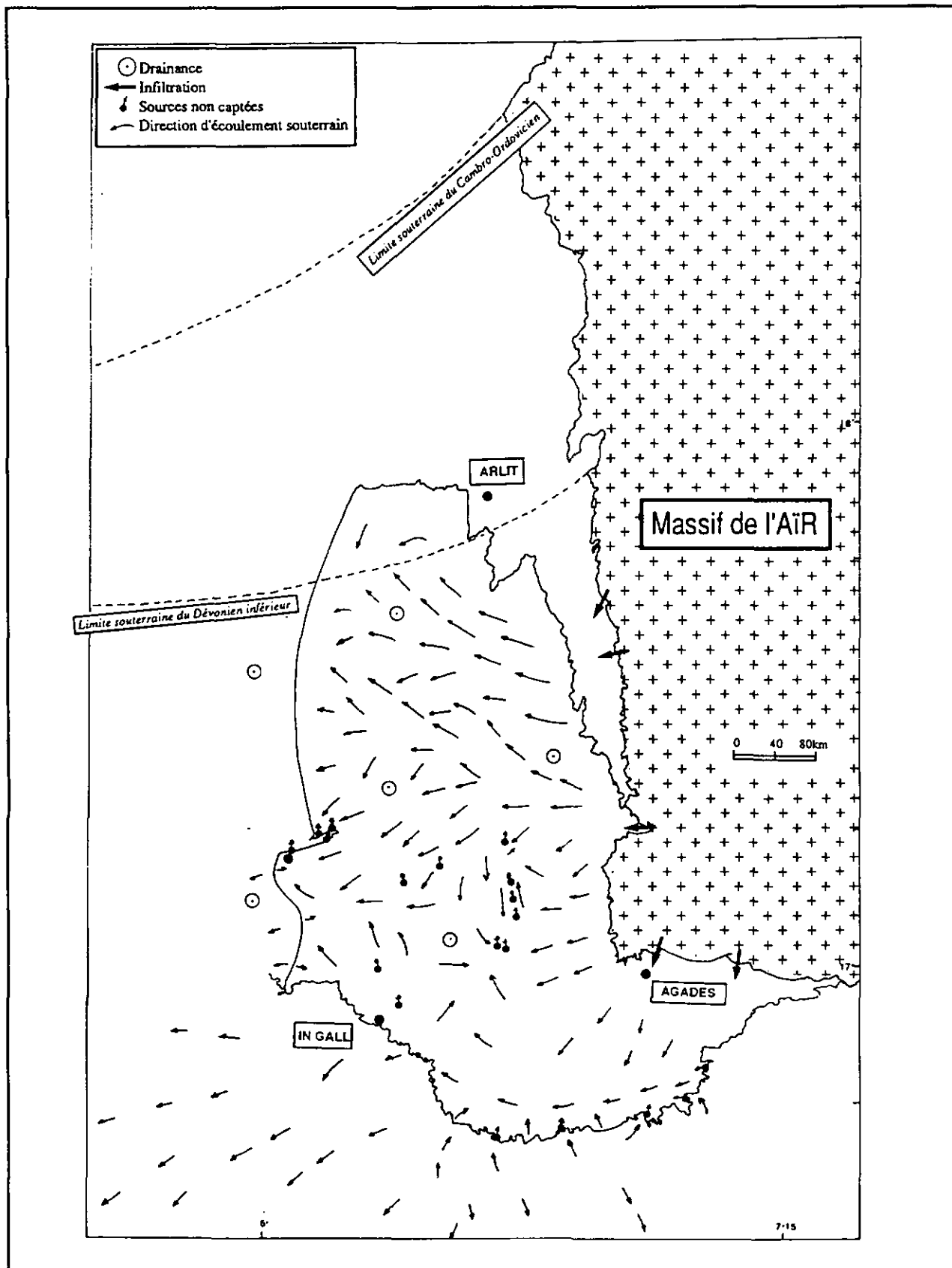


Figure 41 : Alimentation (drainance, infiltration), émergences naturelles (sources) et directions d'écoulement souterrain dans l'Irhazer : conditions aux limites du Groupe des grès d'Agadès.

#### 5.4. Circulations profondes dans le bassin du Niger Occidental

Des écoulements locaux sont pour la plupart situés dans les réservoirs du CT3 et du CT2 (fig. 42). Les aires d'alimentation sont dans les lits des dallols. Les exutoires sont entre les dallols et le fleuve plus au sud-ouest.

Un écoulement intermédiaire englobe les trois réservoirs du CT1, CT2, CT3 et en partie le CI. Son exutoire principal est situé dans le CT2 qui draine les eaux vers le sud-est.

Un écoulement régional alimente les trois réservoirs du CT à la faveur de la suture panafricaine engendrant les dômes piézométriques observés. Le fleuve draine les eaux du CT3 et alimente à son tour le CT1 à travers les altérites du socle [Ousséini et al., 1992].

#### 5.5. Conclusion

Les écoulements souterrains hiérarchisés au travers les aquifères superposés soumis au phénomène de drainance, montrent une continuité hydraulique entre les sous-bassins du Niger. Le débit entrant dans chaque réservoir n'est pas constant ; une partie est reprise par la drainance.

Ils ont permis d'appréhender les conditions hydrogéologiques de la limite inférieure du réservoir du CI et l'exutoire probable du Groupe des grès d'Agadès.

En définitive, les réservoirs du grand bassin du Niger sont en communication au travers des écrans intercalaires semi-perméables.

CINQUIEME PARTIE : Modèles Conceptuels d'Écoulement Souterrain dans le Bassin du Niger

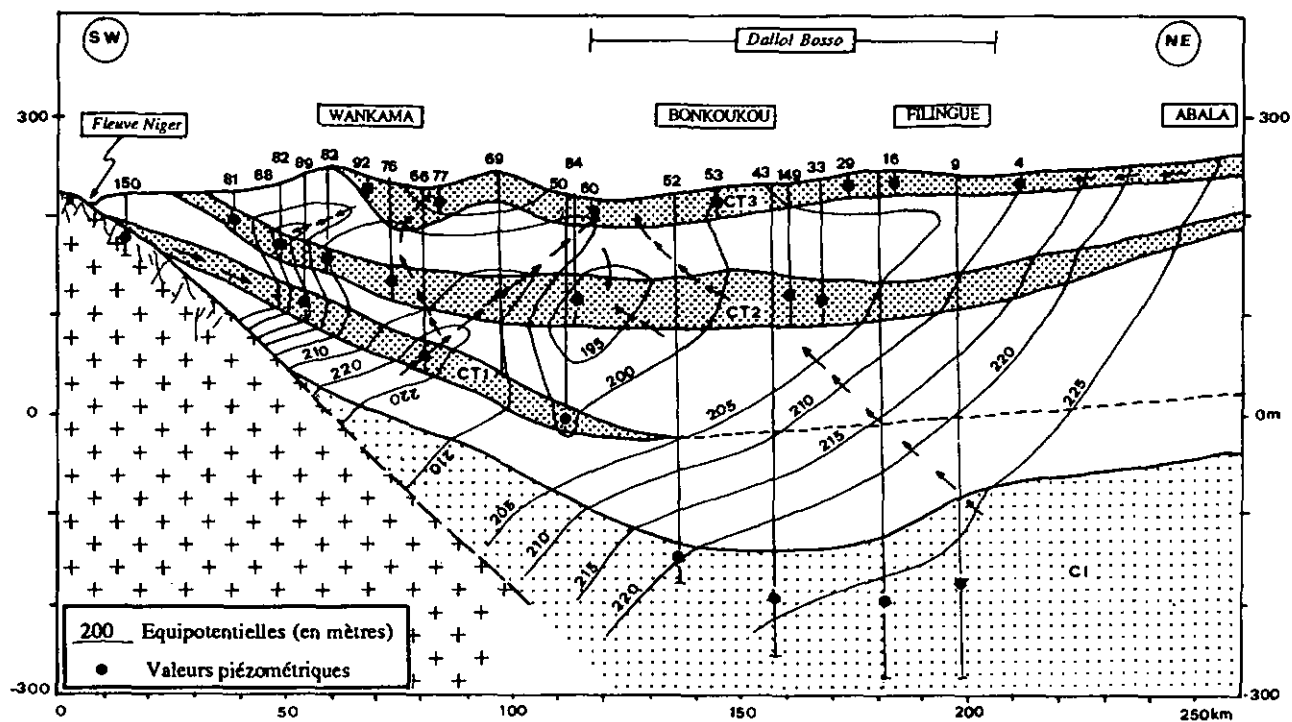
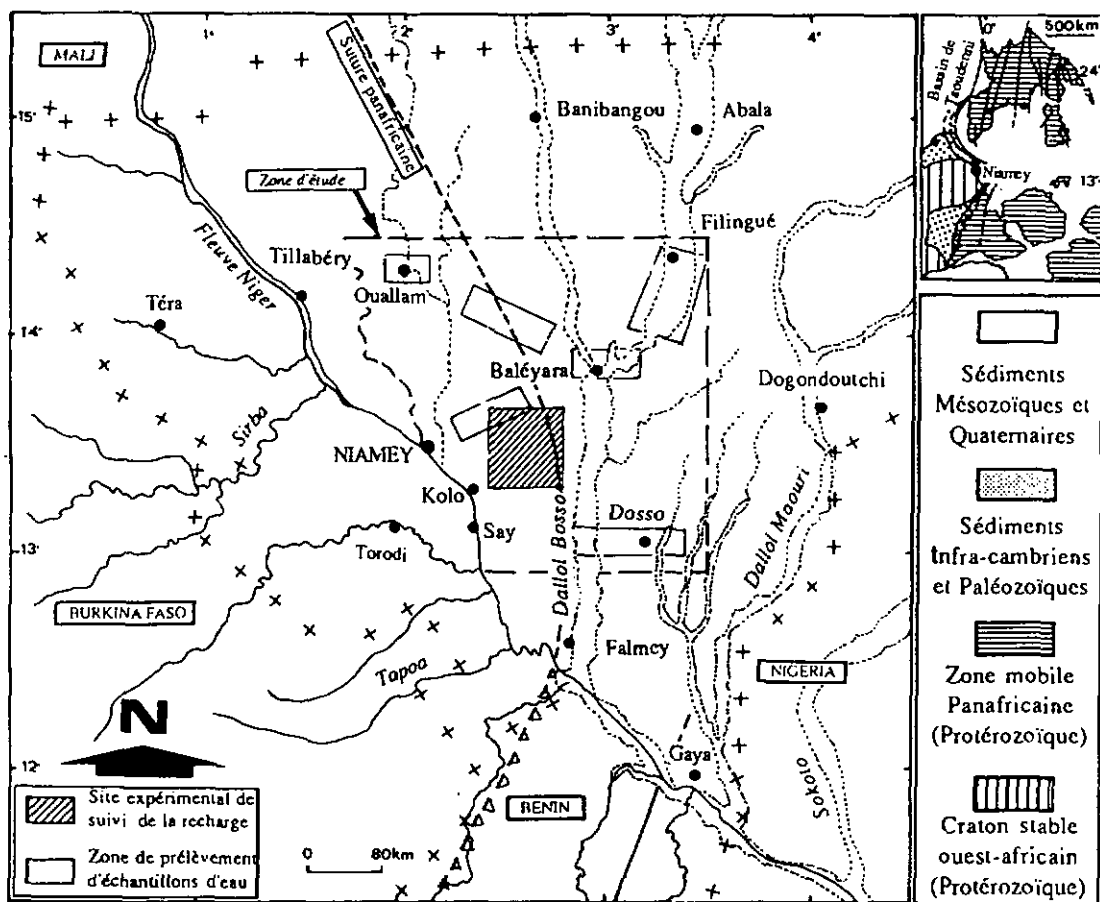


Figure 42 : Modèle conceptuel d'écoulement en coupe nord-est - sud-ouest : relations hydrodynamiques entre les aquifères du Continental intercalaire CI et ceux du Continental terminal CT (Ousséini et al., 1993).

# *Chapitre 6*

*Conclusion Générale et  
Recommandations*

## Chapitre 6

---

# Conclusion Générale et Recommandations

6.1. Conclusion Générale.....	85
6.2. Recommandations .....	87

### 6.1. Conclusion Générale

Le grand bassin sédimentaire du Niger appartient aux régions **arides et semi-arides** de l'Afrique occidentale. Il doit ses caractères climatiques essentiellement à la rencontre de l'Harmattan continental et de la "Mousson" atlantique dans la **Zone Intertropicale de Convergence (ZITC)**.

Les précipitations **moyennes annuelles** varient de 100 à 300mm au Nord et de 300 à plus de 1000mm au Sud. Au cours des vingt (20) dernières années, les isohyètes ont évolué jusqu'à 300km vers le Sud. Les précipitations **moyennes mensuelles** traduisent l'évolution spatio-temporelle de l'**Equateur météorologique**. Elles varient de 50 à 80mm au Nord et de 150 à 250mm vers le Sud. La période pluvieuse s'étend en général, de Mai à Septembre avec des **maximas en Août**.

Les **événements pluvieux** qui contribuent à la **recharge effective** des nappes sont de l'ordre de 5 à 20mm par jour respectivement au Nord et au Sud du bassin. L'**infiltration efficace** est d'environ 1mm par an sur tout le bassin ; elle peut atteindre 2mm plus au sud.

L'**irrégularité des précipitations** influence le régime des cours d'eau temporaires actifs seulement pendant la période pluvieuse en particulier en Août ; leurs débits moyens pendant les épisodes pluvieux sont de l'ordre de quelques m<sup>3</sup>/s à quelques dizaines de m<sup>3</sup>/s. Le fleuve Niger est le seul cours d'eau qui coule durant toute l'année. Ses crues ont lieu en général d'octobre à janvier et les étiages de mai à juin. Exceptionnellement, son cours était à sec en mai 1985 à Niamey.

Le bassin du Niger est subdivisé en trois (3) sous-bassins : le *Tin Séririne*, l'*Irhazer* et l'*Iullemmeden*. L'étude du bassin repose essentiellement sur les informations recueillies à partir de 1330 forages et quelques sources répartis de la manière suivante : 56 dans le *Tin Séririne*, 1058 dans l'*Irhazer*, 216 dans l'*Iullemmeden*. La **profondeur des ouvrages varie respectivement, de la périphérie au centre de chaque sous-bassin, de 20 à 1132m, de 20 à 1061m, et enfin de 40 à 3810m.**

**Une analyse fine** de ces informations a permis d'élaborer **une banque de données factuelles analytiques**. La sélection et le classement de celles-ci par aquifère(s) capté(s) a servi de guide dans l'élaboration d'une **méthodologie d'étude de ceux-ci à raison de la méconnaissance de leur fonctionnement**.

**La géométrie du bassin** a été reconstituée sur la base de 20 cartes d'isohypses du mur et du toit des aquifères et par 18 coupes en série. L'ensemble *Tin Séririne - Ithazer* se présente en une zone subsidente d'axe NS encadrée à l'Est par l'Aïr et à l'Ouest par la dorsale d'In Guezzam. Il est affecté par plusieurs systèmes de failles décrochantes : les flexures-failles senestres NS et N30 héritées du socle, les failles dextres N70 à N80. La flexure-faille NS d'In Azaoua-Arlit traverse et partage le *Tin Séririne - Ithazer* en deux domaines structuraux, un domaine occidental en extension, un domaine oriental comprimé. Le sous-bassin d'*Iullemeden* est découpé par des discontinuités transcratoniques de plusieurs centaines de kilomètres affectant la plaque africaine : la suture panafricaine d'un rejet de 1000m, le linéament guino-nubien dont le rejet peut atteindre 300m, la dorsale d'In Guezzam et le rift de Tafadek. Le bassin du Niger présente une structure complexe ; c'est un ensemble de bassins structuraux subsidents subméridiens.

**La méthodologie d'étude** se caractérise par une démarche par étapes, chacune d'elles devant permettre d'éclaircir les précédentes et de préparer les suivantes : identification des aquifères, définition de leurs conditions aux limites hydrogéologiques, conceptualisation de schémas d'écoulement souterrain en vue de la compréhension de leur fonctionnement. Treize (13) horizons aquifères ont été identifiés dont deux (2) sont secondaires (Namurien inférieur et Permien).

L'identification de ces réservoirs, échelonnés du Cambrien au Quaternaire, passe par des étapes de schématisation, de caractérisation de chaque aquifère et de définition de la drainance entre aquifères. Ces réservoirs sont constitués de grès moyens à grossiers parfois conglomératiques. Ils sont intercalés par des formations argileuses semi-perméables capacitatives (aquitards). La moyenne des épaisseurs maximales des aquifères et aquitards varie respectivement de 70 à plus de 1000m et de 40 à 500m.

La schématisation est l'étape préliminaire. Individualisé dans le bassin, chaque aquifère a été appréhendé par des cartes structurales et piézométriques.

Les cartes d'isohypses du mur et du toit ont représenté sa configuration et sa structure.

Les cartes piézométriques représentent, à une date donnée, la distribution du champ des potentiels hydrauliques et ont préfiguré les conditions aux limites hydrogéologiques. Le "biseau sec" délimite dans chaque aquifère, en relation avec le pendage général, une zone stérile (mur et toit de l'aquifère) dans la partie périphérique amont à un instant donné. L'écoulement général, nord-sud à nord-est - sud-ouest dans les aquifères du *Tin Séririne* et est-ouest à nord-est - sud-ouest dans ceux d'*Ithazer*, est convergent vers les réservoirs d'*Iullemeden*. Dans ce dernier, l'écoulement est divergent vers le fleuve Niger à l'Ouest et vers le lac Tchad à l'Est. Le gradient hydraulique moyen est de l'ordre de  $1 \times 10^{-4}$  dans ces aquifères. La distribution du champ des potentiels est parfois perturbée par des accidents tectoniques engendrant des décalages piézométriques (25m dans l'aquifère du Trias-Jurassique). Exceptés l'aquifère quaternaire et celui du Tertiaire (CT3) à nappe libre, tous les réservoirs sont captifs artésiens.

La caractérisation consiste à représenter, dans la mesure des données disponibles, le champ des caractères hydrodynamiques (K, T, S, ne, Qs) qui régissent les fonctions conductrices et capacitatives de l'aquifère. La perméabilité moyenne dans ces réservoirs est de l'ordre de  $1 \times 10^{-4}$  à  $1 \times 10^{-5}$  m/s, la transmissivité de  $1 \times 10^{-2}$  à  $1 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, le coefficient d'emménagement de  $10^{-2}$  en nappe libre et de  $10^{-5}$  en nappe captive, le débit spécifique de  $1 \times 10^{-1}$  à  $1 \times 10^2$  m<sup>3</sup>/h/m.

Les différences de potentiel entre un aquifère et celui qui le surmonte varient de 5 à 50m. Elles témoignent du transfert d'eau et de pression entre les nappes du bassin du Niger à travers les formations intercalaires semi-perméables (drainance).

L'analyse des données hydrochimiques en particulier la salinité, traceur naturel le plus disponible, ainsi que l'apport de la géochimie isotopique (<sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>4</sup>He), en relation avec les études structurales et piézométriques, ont été utilisées pour corroborer les hypothèses formulées sur la dynamique et les

## SIXIEME PARTIE : Conclusion et Recommandations

conditions aux limites hydrogéologiques de chaque aquifère. Les eaux sont en général peu minéralisées (salinité < 1g/l) excepté dans les régions d'exutoires de certains réservoirs paléozoïques : 24g/l dans le Viséen inférieur, 28g/l dans le Namurien supérieur, 13g/l dans le Permien. Les teneurs en  $^{14}\text{C}$  varient de 130%PMC à l'est dans les zones à nappes libres des aquifères à 0.1% voire 0.0%PMC plus à l'ouest en nappes captives. Le  $^3\text{H}$  est présent surtout dans les alluvions quaternaires (59UT max), cependant, des teneurs de 10UT ont été détectées dans certains forages implantés dans des zones faillées (système de failles N70-80) des aquifères profonds triasico-jurassiques. La température des eaux les plus profondes atteint des valeurs de 63°C.

La définition des conditions aux limites "raisonnables" de chaque aquifère a tenté de traduire clairement ses limites en termes de conditions hydrodynamiques (limite à potentiel, limite à flux non nul, limite à flux nul : seuil hydraulique, failles). Le "biseau sec", à l'instant considéré, est une limite à flux nul.

Le fonctionnement des aquifères a été appréhendé par des **modèles conceptuels d'écoulement souterrain bidimensionnels (2-D)** selon le plan vertical. Ceux-ci, **en cohérence avec les données réelles**, décrivent d'une part les observations hydrodynamiques signalées à travers les cartes piézométriques et chimiques, et d'autre part les **circulations profondes des eaux souterraines** entre les aquifères par le phénomène de drainance à travers les formations argileuses semi-perméables capacitives.

Le bassin sédimentaire du Niger fonctionne ainsi comme un **système aquifère multicouche**. Ses principales aires d'alimentation sont caractérisées par les zones d'affleurement des réservoirs (à nappe libre) à la périphérie du bassin et les massifs cristallins d'où sont issues les eaux d'infiltration d'oueds. Les principaux exutoires naturels observables sont, les nombreuses sources, le fleuve Niger à l'ouest, le lac Tchad à l'est, et enfin l'évaporation (surface piézométrique très proche du sol).

### 6.2. Recommandations

La gestion de tout réservoir devrait passer nécessairement par l'étape fastidieuse mais indispensable de la connaissance du système aquifère (fig. 43).

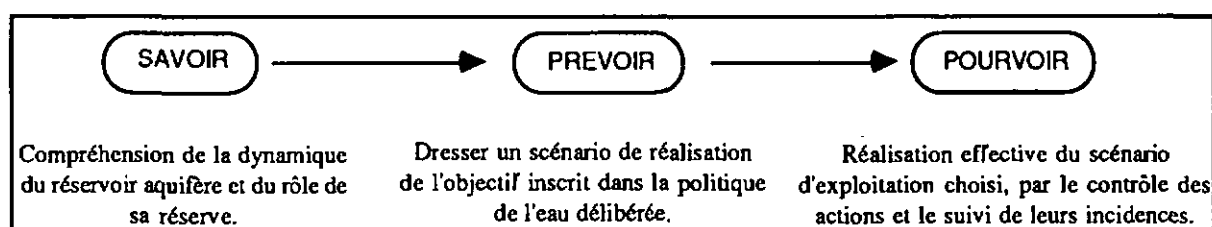


Fig. 43 : Illustration élaborée à partir des travaux de Margat et al. (1982) montrant les principales étapes conduisant à la gestion d'un réservoir.

Au terme de notre travail, nous avons tenté de comprendre, sur la base des données disponibles, le fonctionnement des manifestations hydrogéologiques observées dans le bassin du Niger à l'aide des modèles conceptuels. Il ne fait nul doute que ces modèles ne sont qu'une simplification du système réel. Cependant, il nous paraît important et indispensable d'améliorer :

- 1- la piézométrie de chaque réservoir en implantant des piézomètres dans les zones dépourvues de toute information hydrodynamique,
- 2- le champ des paramètres physiques et hydrodynamiques de chaque réservoir par des essais de pompage,
- 3- les modèles conceptuels d'écoulement souterrain qui exprimeront la complexité structuro-

lithologique et hydrodynamique dans la compréhension des circulations profondes des eaux souterraines.

Le choix d'un modèle tridimensionnel 3-D serait judicieux pour appréhender la complexité des systèmes aquifères du Niger (fig. 44). La modélisation ne sera pas limitée à un aquifère donné pour une période annuelle, mais plutôt à l'ensemble du bassin du Niger en tant que **système aquifère multicouche** dont la gestion programmée et délibérée, devrait être projetée sur des décennies.

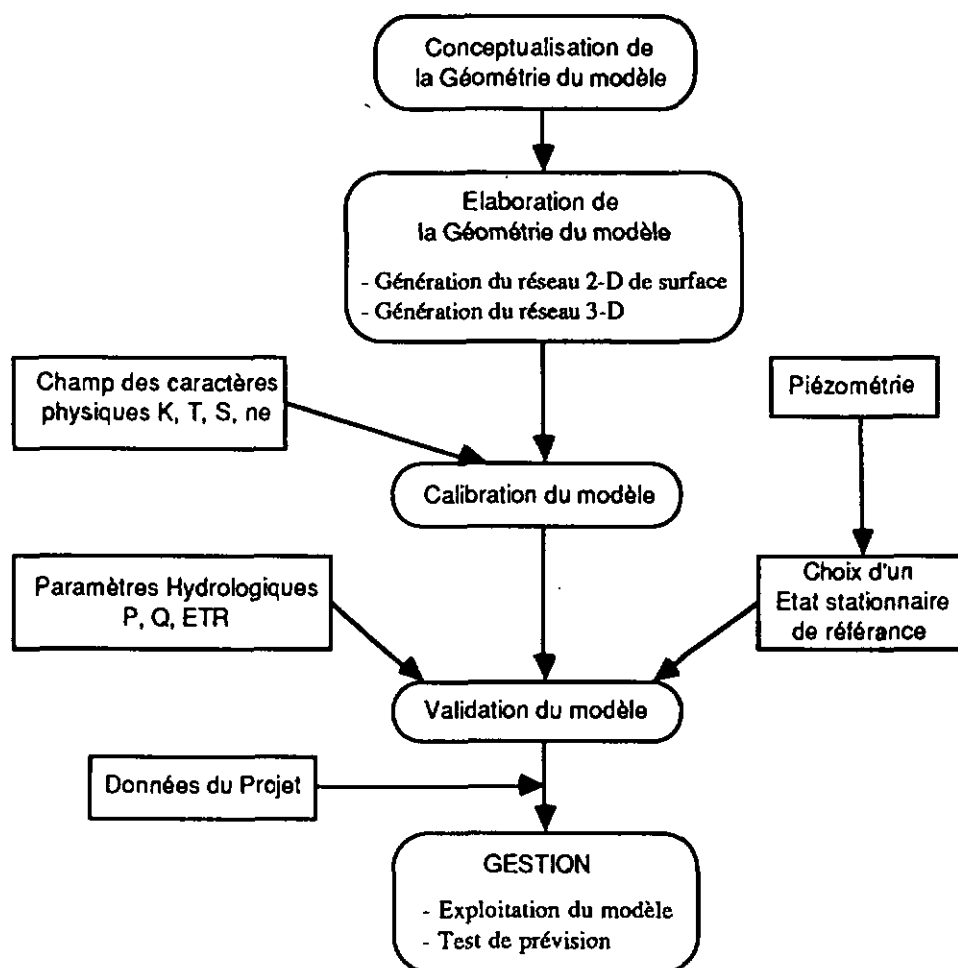


Fig. 44 : Organigramme du modèle de gestion des ressources en eau de l'aquifère multicouche du bassin du Niger.

1. La modélisation devrait passer par la schématisation des aquifères qui permettra de représenter les principales données spatiales objectives nécessaires à la réalisation des modèles utilisables pour la simulation numérique. L'outil privilégié pour exprimer cette schématisation demeure la cartographie hydrogéologique, celle-ci devant être poursuivie et améliorée pour tout le bassin du Niger. Il importe d'élaborer intelligemment une symbolisation :

- 1- des forages en fonction du nombre, de l'âge et du type d'aquifère(s) capté(s), [Dodo & Bouzelboudjen, 1992],
- 2- de la géométrie, la distribution du champ des potentiels hydrauliques et des paramètres physiques et hydrodynamiques des principaux aquifères,
- 3- des données hydro-chimiques et isotopiques de chaque réservoir.

Cette cartographie contribuera efficacement à l'élaboration d'un modèle de gestion concertée des ressources en eau de ce bassin partagé entre l'Algérie, le Mali, et le Niger (principalement) et le Nigéria. Elle pourrait, par exemple, être établie à l'échelle 1:1'000'000.

Il s'agit ensuite de trouver le moyen et la forme adéquats du stockage et de la gestion de ces données adaptées à l'usage possible à l'un des stades de la modélisation. Le Système d'Information Géographique bien élaboré [Bonnier et al., 1991 ; Simonot et al., 1991], peut y répondre dans une large mesure.

2. Le modèle mathématique 3-D sera réalisé d'abord en régime permanent. Il est nécessaire pour vérifier la cohérence des données d'entrée telles que la représentation tridimensionnelle de la géométrie du système multicouche, le champ des perméabilités et les conditions aux limites hydrogéologiques. Il est également nécessaire pour la préparation des conditions initiales telle que la distribution des potentiels hydrauliques au début de la simulation en régime transitoire.

La capacité du modèle sera ensuite testée par la reproductibilité des comportements antérieurs du système réel parfaitement connus (validation du modèle). Le modèle opérationnel sera développé pour la prévision des comportements hydrodynamiques nouveaux du système réel face à l'intervention humaine, délibérée et planifiée (données du projet), tant sur la quantité que sur la qualité de la ressource.

3. Le modèle opérationnel serait, par exemple, utilisé dans deux directions principales :

- 1- des scénarios de production (agricole) active : à la recherche d'un équilibre économique entre le coût de la productivité, de la qualité de l'eau et du débit à pomper en fonction de la profondeur de l'ouvrage.
- 2- une alternative (assurance) pendant les années sèches (à la charge de l'Etat).

4. L'amélioration du modèle de simulation dans son adéquation, s'appuie sur l'amélioration des modèles conceptuels en comblant les principales lacunes d'informations telles que :

- 1- l'extension des aquifères.
- 2- le(s) rôles hydrogéologiques exacts des failles qui doivent être prises en compte dans la simulation numérique.
- 3- les conditions aux limites hydrogéologiques définies avec des argumentations raisonnables.
- 4- la collecte des données nécessaires pour contrôler les résultats simulés, notamment dans les zones à nappe libre sensibles aux sécheresses et pour estimer la reproductibilité du comportement réel de la nappe considérée. En guise d'exemple concrets, nous mentionnons les deux cas suivants :

A.-. le pompage excessif dans les périmètres miniers d'Arlit (Somaïr) et d'Akouta (Cominak) a provoqué une dépression piézométrique dans l'aquifère captif du Namurien (le niveau piézométrique dans le forage Arli 2020bis est passé de 72.56m en mai 1970 à 217.87m en Juillet 1988). A ce rythme, ces réservoirs sont menacés d'une exploitation "minière" avec un risque d'un déficit absolu en cas de tassement irréversible de certaines formations. Il importe donc de suivre à long terme l'évolution du coefficient d'emmagasinement, particulièrement dans les périmètres miniers, en fonction de l'abaissement des niveaux piézométriques.

- B.-** la collecte des chroniques sur les niveaux piézométriques et les régimes des exutoires naturels (sources, fleuve) et artificiels (forages) au Mali, au Niger et au Nigéria, est indispensable pour apporter des précisions sur:
- a- la distribution des potentiels hydrauliques dans les aquifères du Continental intercalaire CI et du Continental Terminal CT,
  - b- le(s) rôle(s) hydrogéologique(s) du graben de Gao notamment les apports d'eaux souterraines en quantité et en qualité issues du bassin de Taoudenni (au Mali),
  - c- les relations eaux superficielles - nappes,
  - d- l'impact d'une sécheresse prolongée sur l'aquifère libre du Continental Terminal (CT3).

Il est clair que l'exploitation des ressources en eau peu renouvelables, caractéristiques du bassin sédimentaire du Niger, qui plus est partagées entre plusieurs pays, préfigure des choix politiques importants. L'objectif d'une modélisation tridimensionnelle du bassin du Niger est de mettre à la disposition des décideurs un choix de mise en valeur des ressources en eau à long terme.

*Neuchâtel, le 21 décembre 1992.*

## *Bibliographie*

# Bibliographie

- ALBINET M., COTTEZ S., 1967. Utilisation et interprétation des cartes de différences de pression entre les nappes superposées. *Chron. Hydrogéol.*, 12, pp. 43-48.
- ANDREWS J. N., FONTES J.-CH., ARANYOSSY J.-F., DODO A., EDMUNDS W. M., TRAVI Y., 1993. The Evolution of Alkaline Groundwaters in the Continental Intercalaire Aquifer of the Irhazer Plain (Niger). *Water Res. Res.* (à paraître).
- ANON/IGN, 1959. Carte topographique d'Agadès (NE-32-II) à l'échelle 1:200'000. *Institut Géographique National, Paris (France) - Ministère des Finances, Direction de la Topographie et du Cadastre, Niamey (Niger)*.
- ANON/IGN, 1959. Carte topographique d'In Allaren Gueri Gueri (NE-32-XIII) à l'échelle 1:200'000. *Institut Géographique National, Paris (France) - Ministère des Finances, Direction de la Topographie et du Cadastre, Niamey (Niger)*.
- ANON/IGN, 1959. Carte topographique d'In Gall à l'échelle 1:200'000. *Institut Géographique National, Paris (France) - Ministère des Finances, Direction de la Topographie et du Cadastre, Niamey (Niger)*.
- ANON/IGN, 1959. Carte topographique de Teguidda In Tagaït (NE-32-VIII) à l'échelle 1:200'000. *Institut Géographique National, Paris (France) - Ministère des Finances, Direction de la Topographie et du Cadastre, Niamey (Niger)*.
- ANON/IGN, 1959. Carte topographique de Teguidda In Tessoum (NE-32-VII) à l'échelle 1:200'000. *Institut Géographique National, Paris (France) - Ministère des Finances, Direction de la Topographie et du Cadastre, Niamey (Niger)*.
- ANON/IGN, 1963. Carte topographique de Kidal (NE-31) à l'échelle 1:1'000'000. *Institut Géographique National, Paris (France) - Ministère des Finances, Direction de la Topographie et du Cadastre, Niamey (Niger)*.
- ANON/IGN, 1974. Carte topographique d'In Azaoua (NF-32) à l'échelle 1:1'000'000. *Institut Géographique National, Paris (France) - Ministère des Finances, Direction de la Topographie et du Cadastre, Niamey (Niger)*.
- ANON/IGN, 1975. Carte topographique d'Agadès (NE-32) à l'échelle 1:1'000'000. *Institut Géographique National, Paris (France) - Ministère des Finances, Direction de la Topographie et du Cadastre, Niamey (Niger)*.
- ANON/IGN, 1975. Carte topographique de Tamanrasset (NF-31) à l'échelle 1:1'000'000. *Institut Géographique National, Paris (France) - Ministère des Finances, Direction de la Topographie et du Cadastre, Niamey (Niger)*.
- ANON/CEA-GAM-NIGER, 1972. Synthèse Sous-Irhazer + Carte hydrogéologique du bassin de l'Irhazer au 1:200'000. *Rapport inédit*.
- ANON/CEA-GAMNIGER, 1970. Route Tahoua-Arlit : résultats des forages pilotes et projets de captages dans la région d'Agadès. (campagne FOREX). *Rapport inédit*.
- ANON/CEA-GAMNIGER, 1972. Permis minier In Adrar : Logs de forages et données hydrogéologiques de la synthèse sous-Irhazer. *Rapport inédit*.
- ANON/COGEMA - GAMNIGER - SCET INTERNATIONAL, 1978. Permis minier Imouraren : Travaux hydrogéologiques. *Rapport inédit*.
- ANON/COGEMA, 1973. Périmètre minier d'Akouta: Etude préliminaire de l'exploitation du gisement d'Akouta dans la concession d'Arlit - Hydrogéologie. Ministère des Mines et de l'Energie. 13p. *Rapport interne*.
- ANON/COGEMA-GAM, 1977. Carte géologique d'Afasto à l'échelle 1:200'000 + Notice explicative, 31p. CEA, Paris (France), Ministère des Mines et de l'Energie, Niamey (Niger). *Rapport inédit*.
- ANON/COGEMA-GAM, 1979. Carte géologique de Teguidda In Tessoum à l'échelle 1/200 000 + Notice explicative, 27p. CEA, Paris (France), Ministère des Mines et de l'Energie, Niamey (Niger). *Rapport inédit*.
- ANON/COGEMA-GAM, 1981. Carte géologique du Tégama à l'échelle 1:500'000 + Notice explicative, 59p. CEA, Paris (France), Ministère des Mines et de l'Energie, Niamey (Niger). *Rapport inédit*.

- ANON/COGEMA-GAM-NIGER, 1970. Permis minier Akouta-Arlit : Etude de la nappe du Tarat. 18p. CEA, Paris (France), Ministère des Mines et de l'Energie Niamey (Niger). *Rapport inédit.*
- ANON/COGEMA-GAM-NIGER, 1972. Permis minier d'Arlit (Somair) : Etude géologique et hydrogéologique de la concession d'Arlit. 30p. Ministère des Mines et de l'Energie, Niamey (Niger). *Rapport interne.*
- ANON/COGEMA-GAM-NIGER, 1978. Permis minier d'Akouta : Hydrogéologie de la nappe du Téloua dans la concession d'Arlit. 53p. Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, Niamey (Niger). 1 carte au 1:200'000. *Rapport interne.*
- ANON/COGEMA GAM-NIGER, 1978. Permis minier d'Imouraren : Hydrogéologie. 109p, 2 cartes. Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, Niamey (Niger). *Rapport interne.*
- ANON/COMINAK. Périmètre minier de Cominak : Logs de forages et séries de données piézométriques. *Rapports inédits.*
- ANON/INTERNATIONAL RESOURCES S.A., 1978. Permis minier de Teguidda N'Tessoum : Hydrogéologie. 81p. Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement. *Rapport interne.*
- ANON/INTRAFOR-COFOR, 1975. Rapport de fin des campagnes de sondages. *Marché FED 74/37. Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, Direction des Infrastructures Hydrauliques, Niamey (Niger).*
- ANON/JAPAN POWER NUCLEAR CORPORATION JPTC. Périmètre minier de Sékiret : Rapport géologique et Logs de forages. *Rapport inédit.*
- ANON/NIGER SUN OIL - GLOBAL ENERGY, 1975. Rapport final de sondage pétrolier Sun Oil Combretum - 1. 30p., 7 fig., 7 ann. *Rapport inédit.*
- ANON/PETROPAR, 1960. Permis minier Esso Minerals : Rapport géologique et Logs de forages pétroliers. *Rapport inédit.*
- ANON/SATOM, 1976. Comptes-rendus d'exécution des forages Anou-Araren, SONICHAR, F1, F2, F3. Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, Direction des Infrastructures Hydrauliques, Niamey (Niger). *Rapport inédit.*
- ANON/SATOM-HYLAF, 1971. *Marché N° 70/134. Forages dans la plaine de l'Irhazer. Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, Direction des Infrastructures Hydrauliques, Niamey (Niger). Rapport inédit.*
- ANON/SOMAIR, 1988. Périmètre minier de Somair : Logs de forages et séries de données piézométriques. *Rapport inédit.*
- ANON/SONAREM, 1975. Mission d'expertise hydrogéologique dans le Hoggar. *Rapport inédit.*
- ANON/UNESCO, 1972. Etude des ressources en eau du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie). 79p., 10 fig., 29 tab., 1 carte hors-texte. UNESCO - Paris : *Rapport final REG 100, 7 vol., annexes techniques.*
- ANON/UNESCO, 1977. Une nouvelle carte de répartition mondiale des régions arides. *Nature et ressources. Vol. XIII. No 3, juillet-septembre 1977. pp. 2-3 + 1 carte.*
- ARANYOSSY J.- F., 1989. Quelques exemples pratiques d'application des isotopes de l'environnement aux études hydrogéologiques. *Bull. BRGM, Hydrogéologie, N° 3, pp. 159-166, 5 fig., 1 tab.*
- ARANYOSSY J.- F., JOSEPH A., 1985. Etude géochimique et isotopique des aquifères de l'Air. AIEA., *Projet NER/81003. 43p.*
- ARCHAMBAULT J., 1962. Les eaux souterraines de l'Afrique occidentale. Ed. Berger Levrault, Nancy. 139p., 29 fig., 2pl. hors-texte.
- ARMAND C., 1987. Actualisation de l'atlas des eaux souterraines du Niger. *Rapport BRGM/FAC/Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement.*

- ASTIE H., BELLEGARDE R., BOURGEOIS M., 1967. Contribution à l'étude des différences piézométriques entre plusieurs aquifères superposées. Application aux nappes du Tertiaire de la Gironde. *Chron. Hydrogéol.*, 12, pp. 49-59.
- BALMER F., DODO A., NOMA I., 1987. Contribution à la connaissance de la situation hydraulique de la ville d'Agadès et de sa région. *Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement. Direction Départementale de l'Hydraulique d'Agadès. MRAIH, DDH-Agadès (Niger). Rapport interne.*
- BAUDET J., BIZARD CH., 1971. Le gisement d'Uranium d'Arlette, région d'Arlit, République du Niger. *Revue de l'Industrie Minérale.*
- BEAR J., 1972. Dynamics of fluids in porous media. *Edition American Elsevier, New York. Environmental Science Series. 764p.*
- BEAR J., 1978. Hydraulics of groundwater. *McGraw-Hill, N.Y., series in Water Resources and Environmental Engineering. Advanced Book Program. 569p.*
- BELLION Y., BENKHELIL J., GUIRAUD R., 1984. Mise en évidence de déformations d'origine compressive dans le Continental intercalaire de la partie méridionale du bassin de Taoudenni (Hoth oriental, confins mauritanomaliens). *Bull. Soc. géol. France, (7), t. XXVI, N° 6, pp. 1137-1147.*
- BELLION Y., J., 1987. Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullemeden, Tchad). *Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 302p., 125 fig., 13 tabl., 1pl.*
- BENABDERRAHMANE A., BOUZELBOUDJEN M., DJOUAHRA R., 1983. Hydrogéologie du Hoggar - Etat des connaissances. *Rapport interne INRH, Ministère de l'Hydraulique Alger, 81p., 14 fig., 3 pl.*
- BERARD P., VANDENBEUSCH M., 1980. Approvisionnement en eau de la Centrale thermique d'Anou Araren à partir de la nappe des grès d'Agadès. Simulation de l'exploitation sur modèle mathématique Tome 1 : Rapport 96p. Tome 2 : Annexes. *BRGM 80/AGE/015.*
- BESBES M., 1978. L'estimation des apports aux nappes souterraines : un modèle régional d'infiltration efficace. *Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris ENSMP, 270p., 88fig., 2 ann. : 37p et 92p.*
- BESBES M., MARSILY DE G., 1978. L'analyse d'un grand réservoir aquifère en vue de sa modélisation. *Association Internationale des Hydrogéologues (AIH). Conférence de Budapest, 1976 sur "Hydrogéologie des grands bassins sédimentaires". Mémoires, Vol XIV, Tome XIV, pp. 94-108.*
- BESBES M., MARSILY DE G., PLAUD M., 1978. Bilan des eaux souterraines dans le bassin Aquitain. *Association Internationale des Hydrogéologues (AIH). Conférence de Budapest, 1976 sur "Hydrogéologie des grands bassins sédimentaires". Mémoires, Vol XIV, Tome XIV, pp. 294-304.*
- BIGOTTE G., OBELLIANNE J.M., 1978. Découverte de minéralisations uranifères au Niger. *Mineral. Deposita (Berlin), 3, pp. 317-333.*
- BISCALDI R., GREIGERT J., JOULIA F., PIRARD F., 1964. Compte-rendu des sondages et forages exécutés de Juillet 1962 à Juillet 1963. *Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, Direction des Infrastructures Hydrauliques, Niamey (Niger). Rapport inédit.*
- BLACK R., JAUJOU M., PELLATON C., 1967. Carte géologique de l'Air à l'échelle du 1:500'000 + Notice explicative. *57p. Ed. BRGM et Direction des Mines et de la Géologie, Niamey (Niger).*
- BONNET M., 1982. Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie. *Thèse de doctorat ès Sciences, Univ. Pierre et Marie Curie. Ecole polytechnique de Lorraine et BRGM. 78SGN655Hyd. 270p., 178pages d'annexes, 2 pl.*
- BONNIER A., 1990. Atlas des ressources en eau souterraine du Continental Terminal. *Projet PNUD/DCTD NER/86/001, Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, 42p., 29 cartes. Rapport inédit.*
- BONNIER A., 1991. Stratégie d'exploitation des ressources en eau du Niger. *Projet PNUD/NER/86/001, Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, Niamey (Niger). 57p. Rapport interne.*

- BONNIER A., 1991. Adéquation entre ressources et besoins en eau. *Projet PNUD/NER/86/001, Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, Niamey (Niger)*. 71p., 8 cartes hors-texte. Rapport interne.
- BONNIER A., JACKOU K., KARBO A., 1991. SIGNER : Le système d'information géographique du Ministère de l'Hydraulique de la République du Niger. *Bull. BRGM, Hydrogéologie, N°1*, pp. 25-34, 6 fig. dont 5 en coul.
- BONNIER A., NGUYEN QUANG TRAC, 1991. Schéma directeur de mise en valeur et gestion des ressources en eau. - Référentiel pour une Rénovation de la Politique de l'Eau. *Projet PNUD/NER/86/001, Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, Niamey (Niger)*. 78p., 15 fig., 3 ann. Rapport interne.
- BOONSTRA N.A. DE RIDDER, 1981. Numerical modelling of groundwater basins. A user-oriented manuel. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI. *Publication 29, Wageningen - The Netherlands*. 226p.
- BOUZELBOUDJEN M., 1987. Hydrogéologie et bilan de la nappe d'El Amra - El Abadia par modèles mathématiques (bassin du moyen Chéouli, Algérie). *Thèse Docteur-Ingénieur en Géologie appliquée. Université de Franche-Comté (France)*, 186p. 78 fig., 24 tab., 8p. d'annexes.
- BOUZELBOUDJEN M., 1988. Gestion intégrée des ressources en eau. *Cours 3ème cycle, Centre Hydrogéologie Université de Neuchâtel (Suisse) et Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*. Inédit.
- BOUZELBOUDJEN M., 1988. Cartographie hydrogéologique. *Cours 3ème cycle, Centre Hydrogéologie Université de Neuchâtel (Suisse) et Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*. Inédit.
- BOUZELBOUDJEN M., 1990. Hydrogéologie : une introduction. *Cours, Université de Genève, Département de Géologie et de Paléontologie* Inédit.
- BOUZELBOUDJEN M., MANIA J., 1989. Hydrogeology of the middle Cheliff basin (Algeria). Simulation of the groundwater flows. *International Workshop on appropriate methodologies for development and management of groundwater resources in developing countries. Hyderabad (INDIA), February 28-March 4, Vol. II*, pp. 505-521.
- BOUZELBOUDJEN M., 1991. 3-D Modelling of the Rhône Aquifer at Visp (Valais, Switzerland). pp. 1-8, 8 fig., 1 tabl. In: *Computer Methods and Water Resources CMWR91. 2nd International Conference Rabat, Morocco 7-11 October 1991*.
- BURGER A., 1985. Hydrogéologie. *Cours de 3ème cycle d'Hydrogéologie, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel*. Inédit.
- CASTANY G., 1962. *Traité pratique des eaux souterraines. Ed. Dunod, Paris*.
- CASTANY G., 1982. Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie-Tunisie). Aquifères du Continental intercalaire et du Complexe Terminal. *BRGM, Hydrogéologie, N° 2, Section III*, pp. 127-149.
- CASTANY G., 1982. *Principes et méthodes en hydrogéologie. Ed. Dunod*. 238p.
- CHEVALLIER P., LAPETITE J.M., 1986. Note sur les écarts de mesure observés entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest. *Hydrol. continent.*, vol. 1, N° 2, pp. 111-119.
- CHIARELLI A., 1978. Etude des nappes profondes du bassin de Douala (Cameroun). *Association Internationale des Hydrogéologues (AIH). Conférence de Budapest, 1976 sur "Hydrogéologie des grands bassins sédimentaires". Mémoires Vol XIV, Tome XIV*, pp. 322-336.
- COLLIN J.-J., 1991. Renouveau de la cartographie hydrogéologique : la rencontre des concepts et des outils. *Hydrogéologie, BRGM, N°1*, pp. 3-6.
- COURNUT, 1966. Permis minier Talak (Pétropar): rapports hydrogéologiques rapportés par 6 sondages d'exploration pétrolière. *CEA*. 23p. Rapport inédit.
- DAVIS STANLEY N., 1987. What is hydrogeology? *Department of Hydrology and Water Resources*, pp. 143-144.

- DEGALLIER R., 1975. Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes souterraines. Applications aux données provenant du bassin de Korhogo (Côte d'Ivoire). *Thèse de Doctorat d'Etat, USTL, Montpellier, 427p., 160 fig., 2 ann.*
- DIENG B., 1987. Paléohydrogéologie et hydrogéologie quantitatives du bassin sédimentaire du Sénégal. *Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. 137p.*
- DIENG B., 1988. Apport des méthodes isotopiques aux reconstitutions paléohydrologiques : cas des nappes déprimées du bassin sédimentaire du Sénégal. *Séminaire de Niamey sur "Le développement des techniques isotopiques et nucléaires en hydrologie et en hydrogéologie dans les pays du Sahel". AIEA, Projet RAFI81012, pp.57-69.*
- DIENG B., LEDOUX E., DE MARSILY G., 1990. Paleohydrogeology of the Senegal sedimentary basin : a tentative explanation of the piezometric depressions. *J. of Hydrol., 118 : 357-371.*
- DODO A., 1986. Etude hydrogéologique des vallées de Tchinn Tabisguin, Awagadi et Al Raslin (Région d'Agadès - Niger). *Mémoire du Diplôme de 3ème Cycle, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel. 70p., 24fig., 9tab., 10pl., 1 corte hors-texte. Annexes.*
- DODO A., 1989. Sur les rôles hydrogéologiques des failles dans les vallées du Sud de l'AïR (République du Niger). *Séminaire International sur "l'Etat de l'art en Hydrologie et en Hydrogéologie dans les pays arides et semi-arides d'Afrique". Ouagadougou - Burkina Faso. pp. 636-648, 8fig.*
- DODO A. ET BOUZELBOUDJEN M., 1989. Place du bassin sédimentaire de Tin Séririne-Irhazer dans son contexte hydrogéologique régional du Sahara Central Méridional (Hoggar, AïR). *Bull. Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel (Suisse), N° 9, pp. 49-65, 7fig., 8tabl.*
- DODO A., BOUZELBOUDJEN M., SAFAR-ZITOUN M., ZWAHLEN F., 1991. Carte hydrogéologique du bassin sédimentaire de l'Irhazer (Sud Hoggar, Ouest Aïr) au 1:500'000 - Epreuve d'essai. *Annexe 3 du Rapport Final de la Quatrième Réunion d'Experts OACT-PCHIA, Nairobi - Kenya du 13 au 17 mars 1991, 6p., 4fig.*
- DODO A., BOUZELBOUDJEN M. 1992. Eléments pour la carte hydrogéologique du bassin de l'Irhazer. *Bull. BRGM, Hydrogéologie, N°1-2, 1992, pp. 59-68, 7 fig., 1 ann.*
- DODO A., BOUZELBOUDJEN M., MARGAT J., 1993. Hydrodynamics of Niger sedimentary basin. *J. of Hydrol. (en cours).*
- DODO A., BOUZELBOUDJEN M., 1993. Carte Hydrogéologique du bassin de l'Irhazer au 1:500'000 (Aquifères des grès d'Agadès) + Notice explicative 20p. *Ed. OACT-PCHIA. (à paraître).*
- EMSELLEM Y., 1967. Les transferts de pression entre nappes et la drainance dans les aquifères hétérogènes. *Chron. Hydrogéol., 12, pp. 131-152.*
- ENGELN G.B., JONES G.F., 1986. Developments in the analysis of groundwater flow system. *AIHS publ., 163, 356p.*
- FABRE J., 1976. Introduction à la géologie du Sahara algérien. *Société Nationale d'édition et de diffusion SNED, N° 334-73, Alger, 422p.*
- FABRE J., 1983. Afrique de l'Ouest - West Africa. Introduction géologique et termes stratigraphiques. *Lexique stratigraphique international, Nlle Série 1, Pergamon, 416p.*
- FONTES J. CH., 1976. Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects. *Thèse de doctorat, Univ. Paris VI. 208p.*
- FONTES J. CH., ANDREWS J. N., EDMUNDS W. M., GUERRE A., TRAVI Y., 1991. Paleorecharge by the Niger River (Mali) Deduced From Groundwater Geochemistry. *Water Res. Res., Vol. 27, N°2, pp. 199-214.*
- FORBES P., 1989. Rôles des structures sédimentaires et tectoniques du volcanisme alcalin régional et des fluides diagénétiques-hydrothermaux pour la formation des minéralisations à U-Zr-Zn-V-Mo d'Akouta (Niger). *Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne - Centre de Recherches sur la Géologie de l'Uranium, Géol. Géochim. Uranium, Mém. Nancy, N° 17, 376p, 111fig., 37tabl, 8pl.*

- FORBES P., PACQUET A., CHANTRET F., OUMAROU J., PAGEL M., 1984. Marqueurs du volcanisme dans le gisement d'Uranium d'Akouta (Niger). *C.R. Acad. Sci. Paris. T. 298, série II, N° 15. pp. 647-650.*
- FORKASIEWICZ J., 1982. Aquifère du Maestrichtien du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien. *Bull. BRGM, 2ème série, N° 2, Section III, pp. 185-197.*
- FORKASIEWICZ J., 1982. Bassin sédimentaire nubien (Egypte, Libye, Soudan). *Bull. BRGM, 2ème série, N° 2, Section III, pp. 149-177.*
- FORKASIEWICZ J., 1982. Grand bassin artésien australien. *Bull. BRGM, 2ème série, N° 2, Section III, pp. 197-213.*
- FORKASIEWICZ J. ET MARGAT J., 1966. La drainance et les communications entre les couches aquifères. *Rapport du BRGM, DS 66A 110. 28p.*
- FORKASIEWICZ J. ET MARGAT J., 1982. L'exploitation des réserves d'eau souterraine en zones aride et semi-aride. Essai de synthèse. *Bull. BRGM, Hydrogéologie, N° 2, Section III, pp. 115-127.*
- FRANCONI A., 1985. Carte des gîtes minéraux du Niger à l'échelle 1:1'000'000 + Notice explicative 44p. 4 coupures. *Ministère des mines et de l'Energie Niamey (Niger) - Projet FAC N° 259ICD180.*
- FREEZE R. A., WITHERSPOON P. A., 1966. Theoretical analysis of regional groundwater flow, 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. *Water Res. Res., 2(4), pp. 641-656.*
- FREEZE R. A., WITHERSPOON P. A., 1967. Theoretical analysis of regional groundwater flow, 2. Effet of water table configuration and subsurface permeability variation. *Water Res. Res., 3(2), pp. 623-634.*
- FREEZE R. A., WITHERSPOON P. A., 1968. Theoretical analysis of regional groundwater flow, 3. Quantitative interpretations. *Water Res. Res., 4(3), pp. 580-590.*
- GALBANE A., BOUZELBOUDJEN M., DODO A., ZWAHLEN F., 1992. Hydrogéologie des roches fissurées en pays cristallin- Centre-Est du Burkina Faso. *5ème colloque international d'Hydrologie en pays calcaire et en milieu fissuré, Neuchâtel - Suisse, 16-18 Octobre 1992. Annales scientifiques de l'Université de Besançon. Géologie - Mémoires Hors-Série, N° 11 - 1992, Tome 1, pp. 51-56.*
- GASSE F., TEHET R., DURAND A., GILBERT E., FONTES J.CH., 1990. The arid-humid transition in the Sahara and the Sahel during the last deglaciation. *In : Nature. Vol. 346, pp. 141-146.*
- GREIGERT J., 1978. Atlas des eaux souterraines du Niger : état des connaissances (Mai 1978). *Rapport du BRGM 79 AGE 001. Tomes 1 et 2.*
- GREIGERT J., POUUNET R., 1967. Carte géologique de la République du Niger. Echelle 1:2'000'000 + Notice explicative, 62p. *Ed. BRGM Orléans (France), Ministère des Mines et de l'Energie Niamey (Niger).*
- GRIBI A., 1992. Modèle de simulation de l'aquifère des grès du Cambro-Ordovicien du bassin de Tin Séririne (Tassilis Ouan-Ahaggar). *Bull. BRGM, Hydrogéologie, N° 1-2, 1992, 5 fig., 1 tabl., pp. 79-87.*
- GRIBI A., SAI N., YOUNSI N., 1992. Carte hydrogéologique du Hoggar et des Tassilis à 1:1'000'000 (Algérie). *Bull. BRGM, Hydrogéologie, N° 1-2, 1992, 3 fig., 2 tabl., pp. 69-77.*
- GUENDOZ A., 1985. Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara nord-est septentrional (Algérie). *Thèse de Doctorat en Géologie Appliquée, Univ. de Paris Sud Centre d'Orsay. 243p., 65fig., 29tab.*
- HERCZEG A.L., TORGERSEN T., CHIVAS A.R., HABERMEHL M.A., 1991. Geochemistry of ground waters from the Great Artesian Basin, Australia. *J. of Hydrology, Vol. 126, N°s3-4, pp. 225-246.*
- HIRLEMANN G., ROBERT J.P., 1980. Permis minier Imouraren : Analyse structurale. *COGEMA-Association Imouraren. 95p., 70fig., 11pl., 6 pl. Rapport inédit.*
- HUBBERT M.K., 1940. The theory of ground-water motion and related papers. *Ed. Hafner publishing company, New York and London, 311p.*

- JOSEPH A., 1990. Recharge des aquifères en région semi-désertique, au sud du Sahara de l'Afrique de l'Ouest (Niger). *Thèse de Doctorat, Univ. Paris VI, 167p., 2 ann. 7p. et 5p.*
- JOSEPH A., ARANYOSSY J.-F., 1985. Etude géochimique et isotopique des aquifères de la plaine de l'Irhazer. *AIEA. TA/2331. Projet NER/8/003. Vienne. 33p.*
- JOSEPH A., ARANYOSSY J.-F., 1989. Mise en évidence d'un gradient de continentalité inverse en Afrique de l'Ouest en relation avec les lignes de grain. *Bull. BRGM, Hydrogéologie, N° 3, pp. 215-218, 3fig., 1tab.*
- JOULIA F., 1957. Les séries primaires au nord et au nord-ouest de l'Aïr (Sahara Central). Discordances observées. *Bull. Soc. Géol. Fr., pp. 192-196.*
- JOULIA F., 1959. Précisions sur la discordance cambro-ordovicienne d'In Azaoua (Niger). *Bull. Soc. Géol. de Fr., pp. 177-178.*
- JOULIA F., 1959. Sur l'existence d'un important système de fractures intéressant le Continental intercalaire à l'ouest de l'Aïr (Niger). *Bull. Soc. Géol. de Fr., pp. 137-143.*
- JOULIA F., 1963. Carte géologique de reconnaissance de la bordure sédimentaire de l'Aïr. Echelle 1:500'000, Feuilles Nord et Sud. *Ed. BRGM Orléans (France), Ministère des Mines et de l'Energie, Niamey (Niger).*
- JOULIA F., 1965. Hydrogéologie des régions à l'ouest et au sud de l'Aïr. *Rapport du BRGM, DAK/65/A16, 64p., 33fig., 2 cartes hors-texte.*
- KIMMEIER F., PERROCHET P., ANDREWS R., KIRALY L., 1985. Simulation des écoulements souterrains entre les Alpes et la forêt Noire par modèle mathématique. *NAGRA NTB 84-50, Baden et Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel (Suisse). 169p. et pl.*
- KINZELBACH W., 1986. Groundwater modelling with sample programs in basic. *Elsevier, Amsterdam. Developments in Water Science; 25. 333p.*
- KIRALY L., 1969. Statistical analysis of fractures (orientation and density). *Geol. Rundschau. 59/1, pp. 125-151.*
- KIRALY L., 1970. L'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de la perméabilité sur les systèmes d'écoulement. *Bull. Ver. Schweiz, Petrol.-Geol. u.-Ing., Vol. 37, Nr. 91, Oktober 1970, S. 50-57.*
- KIRALY L., 1973. Carte hydrogéologique du Canton de Neuchâtel + Notice explicative. 15p. *Bull. Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel - Bull. Soc. Neuch. Sci. Nat.*
- KIRALY L., 1976. Etude de la régularisation de l'Areuse par modèle mathématique. *Bull. Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, N° 1, pp. 19-36.*
- KIRALY L., 1978. La notion d'unité hydrogéologique. Essai de définition. *Thèse de Doctorat, Bull. Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, N° 2, pp. 83-216, 30fig.*
- KIRALY L., 1979. Remarques sur la simulation des failles et du réseau karstique par éléments finis dans les modèles d'écoulement. *Bull. Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, N° 3, pp. 155-167.*
- KIRALY L., 1985. FEM 301. A three dimension model for groundwater flow simulation. *Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel et NAGRA Technical report 84-49, Baden. 96p.*
- KIRALY L., 1985, 1992. Les modèles mathématiques en Hydrogéologie. *Cours de 3ème cycle en Hydrogéologie, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel. Inédit.*
- KIRALY L., 1987. Large scale 3-D groundwater flow modelling in highly heterogeneous geologic medium. In *Groundwater flow and quality modelling, Ed. E. Custodio, pp.761-775.*
- KIRALY L., MUDRY J., MULLER I., 1979. Analyse multivariée du chimisme de quelques sources karstiques du Jura suisse et franc-comtois. *Bull. Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, N° , pp. 183-222.*
- LEDOUX E., 1986. Modèles mathématiques en hydrogéologie. *Rapport ENSMP-CIG LHM/86/12. 120p.*

- LESSARD L., 1962. Les séries primaires des Tassilis Ouan-n-Ahaggar au Sud du Hoggar entre l'Aïr et l'Adrar des Iforas (Sahara méridional). *Bull. Soc. Géol. Fr. (7), T. III - 35, pp. 501-513.*
- LLOYD J.W., 1990. Groundwater resources development in the eastern Sahara. *J. Hydrol., 119: 71-87.*
- MANIA J., 1978. Gestion des systèmes aquifères : application au Nord de la France. *Mém. Soc. Géol. du Nord (SGN), Tome XIV, 228p.*
- MARGAT J., 1966. La cartographie hydrogéologique. *Bull. BRGM, Hydrogéologie, A130, 58p, 14fig.*
- MARGAT J., 1967. Le bilan des nappes captives. *Document BRGM, DS67A85.*
- MARGAT J., 1967. Remarques sur la signification des surfaces piézométriques des nappes captives. *Chron. Hydrogéol., 12, pp. 13-17.*
- MARGAT J., 1976. Analyse des systèmes aquifères et évaluation des ressources en eau souterraine. *Rapport BRGM, 79 SGN 532 AME, 34p., 6fig., 6tabl.*
- MARGAT J., 1979. La cartographie des ressources en eau souterraine. *Rapport du BRGM, 79 SGN 783 HYD, 15p.*
- MARGAT J., 1982. Aquifère du Continental intercalaire du bassin sédimentaire du Niger (Mali, Niger, Nigéria). *Bull. BRGM, Hydrogéologie, N° 2, Section III, pp. 177-185.*
- MARGAT J., 1982. Planification de l'exploitation des eaux souterraines en zones aride et semi-aride. *Conférence au cours international sur "la planification des eaux en zones aride et semi-aride" du CEFIGRE (SOPHIA-ANTIPOLIS - 15 septembre - 15 octobre 1982). Rapport du BRGM, 82 SGN 928 EAU, 32p., 3fig., 6tabl., 2ann.*
- MARGAT J., 1982. Exploitation des réserves d'eau souterraine en Arizona (USA). *Bull. BRGM, Hydrogéologie, N° 2, Section III, pp. 213-218.*
- MARGAT J., 1990. Les gisements d'eau souterraine. *La Recherche, N° 221, Mai, pp. 590-596, Paris.*
- MARGAT J., 1991. Comment gérer les ressources en eau non renouvelables en zone aride? *Bull. BRGM, 1991.*
- MARGAT J. 1991. Eléments cartographiables en hydrogéologie. *Rapport Final de la Quatrième Réunion d'Experts OACT-PCHIA, Nairobi - Kenya du 13 au 17 mars 1991, 8p.*
- MARGAT J. 1991. Représentation cartographique. *Rapport Final de la Quatrième Réunion d'Experts OACT-PCHIA, Nairobi - Kenya du 13 au 17 mars 1991, 8p.*
- MARGAT J., 1992. Les eaux fossiles. *Afrique contemporaine, N° 161, (spécial), 1er trimestre 1992, pp. 76-78.*
- MARGAT J., SAAD K. F., 1982. Utilisation des ressources fossiles - Analyse de cas historiques. *4e Conf. internat. sur la planification et la gestion des eaux, Comm. europ. médit. planific. eaux/C.E.M.P.E., Marseille, 10-12/05/1982. Rapport général thème 6, - Bull. BRGM, Hydrogéologie, N° 3, Orléans.*
- MARGAT J., SAAD K. F., 1984. Les nappes souterraines profondes: des mines d'eau sous les déserts? *Nature et Ressources, UNESCO/Vol. XX, N° 2, avril-juin 1984, pp. 7-13, Paris; Ed. en anglais: "Mining desert aquifers" et en espagnol: "Minas de agua bajo los desiertos."*
- MARSILY DE G., 1978. De l'identification des systèmes hydrogéologiques. *Thèse de Doctorat ès Sciences, Univ. Pierre et Marie Curie. Paris VI, Tomes, 1 et 2, 215p. et 396p.*
- MARSILY DE G., 1981. Hydrogéologie quantitative. *Collection Sciences de la Terre. Ed. Masson. Paris. 215p.*
- MARSILY DE G., 1986. Quantitative hydrogeology. *Groundwater hydrology for engineers. Academic Press, Inc. 435p.*
- MARSILY DE G., LEDOUX E., LEVASSOR A., POITRINAL D., SALEM A., 1978. Modelling of large multilayered aquifer system: theory and applications. *J. of Hydrol., 36 (1978), pp. 1-34.*

- MARTY R., 1967. Calcul en écoulement linéaire du comportement de la pression d'une nappe soumise ou non au phénomène de drainance. *Chron. Hydrogéol.*, 12, pp. 31-41.
- MELLOUL A., 1979. Connaissance hydrogéologique des grands aquifères profonds en milieu poreux et à données peu nombreuses. Méthodologie d'étude basée sur les paramètres géochimiques et isotopiques. *Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel (Suisse)*. 268p., 57fig., 35tab.
- MOREL R., 1992. Notice explicative de l'atlas agro-climatologique du Sahel. *Centre AGRHYMET, Niamey (Niger)*. 161p. Mars 1992.
- MUZZOLLINI A., 1983. L'intensité des "humides" holocènes sahariens : estimations maximalistes et estimations modérées. *Archéologie Africaine et Sciences de la Nature appliquées à l'Archéologie. 1er Sympos. Internat. (Bordeaux, 1983), ACTT - CNRS - CRIAA, 1986*, pp. 53-69.
- MUZZOLLINI A., 1985. Les climats au Sahara et sur ses bordures, du Pléistocène final à l'aride actuel. *Empúries, Barcelona (1985)*, pp. 8-27.
- NOUIOUAT A.C., 1990. Notice de la carte hydrogéologique internationale de l'Afrique : Afrique septentrionale du Centre. Feuille N° 2. *OACT, Alger. Epreuve d'essai*. 82p.
- OPHORI D., TOTH J., 1990. Relationships in regional groundwater discharge to streams: an analysis by numerical simulation. *J. of Hydrol.*, 119: 215-244.
- OPHORI D.U., TOTH J., 1989. Characterization of groundwater flow by mapping and numerical simulation. Ross Creek Basin (Alberta, Canada). *In : Groundwater, Vol 27, N° 2*, pp. 193-201.
- OULONA T.G., 1979. Préparation d'un modèle mathématique de la nappe phréatique du Chari-Baguirmi (Tchad) en vue d'une gestion optimale. *Bull. Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, N° 3*, pp.95-114.
- OUSMANE B., 1988. Etude géochimique et isotopique des aquifères du socle de la bande sahélienne du Niger (Liptako, Sud-Maradi et Zinder-est). *Thèse de Doctorat ès Sci. Nat., Université de Niamey*.
- OUSSEINI B., BOUZELBOUDJEN M., DODO A., ZWAHLEN F., 1992. Circulations profondes des eaux du Continental terminal (Niger). *Bull. Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel (Suisse) N° 11, 1992, 10p, 9fig. (sous presse)*.
- PERRODON A., 1985. Géodynamique pétrolière: genèse et répartition des gisements d'hydrocarbures. *Ed. Masson - Elf-Aquitaine*, 385p., 220 fig., 5 tabl., 4 pl.
- RILEY J.A., STEINHORST R.K., WINTER G.V., WILLIAMS R.E., 1990. Statistical analysis of the hydrochemistry of ground waters in Colombia River basalts. *J. of Hydrol.*, 199: 245-262.
- ROGNON P., 1989. Biographie d'un désert. *Ed. Plon scientifique*, 347p., 20 fig.
- SAFAR-ZITOUN M., 1992. Présentation du Programme de cartographie hydrogéologique internationale de l'Afrique (PCHIA). *Bull. BRGM, Hydrogéologie, N° 1-2, 1992, 3 fig., pp 3-7*.
- SAFAR-ZITOUN M., STRUCKMEIER W. 1991. Analyse et conception d'un programme de cartographie hydrogéologique par la méthode ZOPP. *Rapport Final de la Quatrième Réunion d'Experts OACT-PCHIA, Nairobi - Kenya du 13 au 17 mars 1991, 25p*.
- SAMSON PH., 1977. Minéralisations uranifères du bassin d'Agadès (Niger). *Somair - Arlit, 58p., 16fig. Rapport interne*.
- SCHOELLER H., 1962. Les eaux souterraines. *Ed. Masson*. 642p., 187fig.
- SCHROETER P., JOSEPH A., DODO A., 1987. Etude hydrochimique et isotopique dans l'Aïr, le Ténéré du Tafassasset et le Kaouar. Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement et Université de Niamey, Département de Géologie. Rapport interne.

- SEMPERE T., BEUDOIN B., 1984. Discontinuités et séquences dans la formation de Tarat (Viséen supérieur) et l'unité d'Arlit (Namuro-Westpalien) à Arlit (Niger). Evolution sédimentaire, climatique et tectonique de la région au Carbonifère. *Bull. Soc. Géol. Fr. (7)*, t. XXVI, N° 6, pp. 995-1014.
- SIMONOT M., WALRAEVENS, 1991. SIGMA: Un outil de gestion des ressources en eau du Mali. *Bull. BRGM, Hydrogéologie*, N° 1, pp. 35-44, 3 fig. coul.
- SOUMA G.A.R., 1989. TRANS3 : Modèle numérique d'un transfert de masse et énergie conductif-advectif par éléments finis en une, deux et trois dimensions. (Programme d'ordinateur en Fortran77). *Thèse, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel*, 178p., 49fig., 3ann. + listing du prog.
- STRUCKMEIER W. ET AL., 1983. International legend for hydrogeological maps. *Revised edition, IAH, UNESCO. Paris*, 51p. English. SC.84/WS/7.
- TOTH J., 1962. A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta (Canada). *J. of Geophys. Res.* vol 67, N° 11, pp. 4375-4381.
- TOTH J., 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. of Geophys. Res.* vol 68, N° 16, pp. 4795-4811.
- TOTH J., 1966. Mapping and interpretation of field phenomena for groundwater reconnaissance in a Prairie environment, Alberta, Canada. *Bull. Int. Assoc. Sci. hydrology*, Vol. 9, pp. 20-68.
- TOTH J., 1978. Gravity-Induced cross-formational flow of formation fluids, red earth region, Alberta, Canada : analysis, patterns and evolution. *In : Water Res. Res.*, Vol. 14, N° 5, pp. 805-843.
- VALSARDIEU C., 1970. Etude géologique et paléogéographique du bassin de Tim Mersoï, région d'Agadès (Niger). *Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Faculté des sciences, Univ. de Nice*, 800p. 90fig., 9tab., 34pl.
- WEAVER T. R., BAHR J. M., 1991. Geochemical Evolution in the Cambrian-Ordovician Sandstone Aquifer, Eastern Wisconsin : 1. Major Ion and Radionuclide Distribution. *Groundwater*, Vol. 29, N° 3, pp. 350-356.
- WEAVER T. R., BAHR J. M., 1991. Geochemical Evolution in the Cambrian-Ordovician Sandstone Aquifer, Eastern Wisconsin : 2. Correlation Between Flow Paths and Groud-Water Chemistry. *Groundwater*, Vol. 29, N° 4, pp. 510-515.
- WEI H.F., LEDOUX E., MARSILY DE G., 1990. Regional modelling of groundwater flow and salt and environmental tracer transport in deep aquifers in the Paris basin. *J. of Hydrol.*, 120, pp. 341-358.
- ZEBIDI H., 1986. Bilan des ressources en eau de la Tunisie. *Direction Ressources en Eau, Tunis*.
- ZIENKIEWICZ O.C., 1979. La méthode des éléments finis. Traduit de la 3ème édition anglaise par Armand Jean Louis. *Ediscience-Mc Graw-Hill Inc. Paris*. 851p.
- ZOREIK A., 1986. Note sur les études hydrogéologiques réalisées au Hoggar. *EREM*, 18p. *Rapport inédit*.
- ZUPPI G.M., 1981. Rapport d'avancement sur l'étude du massif de l'Aïr. *Rap. 1771, AIEA, Vienna*, 28p.

*Bibliographie arrêtée à l'année 1992*

# Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel CHYN

## Liste des travaux de diplôme de 3ème cycle réalisés au Niger

- YACOUBA Issoufou, 1985.** Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin occidental du Niger continental intercalaire- Grès du Tegana. *Dipl. 3ème cycle CHYN (août 1985).*
- DODO Abdel-Kader, 1986.** Etude hydrogéologique des vallées de Tchín Tabisguin, Awagadi, Al Raslin (bordure occidentale du Massif de l'Aïr, Niger). *Dipl. 3ème cycle CHYN. 70p., 24fig., 9tabl., 10pl., annexes + 1 carte (novembre 1986).*
- KORONEY Maoudé, 1988.** Contribution à l'étude hydrogéologique du Tadiss de Tahoua. *Dipl. 3ème cycle CHYN (septembre 1988).*
- MAGNIN Olivier, 1989.** Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe de Teloua dans la région d'Agades (république du Niger). *Dipl. 3ème cycle CHYN (mai 1990).*
- ZAKARA Zibo, 1990.** Contribution à l'étude hydrogéologique des nappes des Korama - Zinder - République du Niger. *Dipl. 3ème Cycle CHYN, 85 p., 35 fig., 15 ann. (décembre 1990).*
- CERVERA Guillaume, 1990 :** La nappe alluviale du Téloua (Agadez, Niger). Modèle de simulation. *Dipl. 3ème Cycle CHYN-IUED, 52 p., 36 fig., 2 ann.*
- PITTELOUD Elisabeth, 1991.** Hydrochimie des aquifères alluviaux des vallées de l'Aïr (Rép. du Niger). Vallées du Teloua-cuvette d'Agadez, Tchín Tabisguin et Tamazelak. *Dipl. 3ème Cycle CHYN-IUED, 77 p., 13 fig., 3 tabl., 8 cartes, 7 ann.*
- OUSSEINI Bachir, 1991.** Etude de l'aquifère multicouche du Continental Terminal à l'est de Niamey. *Dipl. 3ème Cycle CHYN, 19p., 35 fig., 5 tabl., 2 ann. (décembre 1991).*
- GERBER Christian 1992.** Les mécanismes de la recharge de la nappe alluviale du Téloua dans la cuvette d'Agadès (Niger). *Dipl. 3ème Cycle CHYN, 143., 79 fig., tabl., 39 ann.*
- TANKARI Chaïbou, 1992.** Etude hydrogéologique du Continental Terminal et de son substratum cristallin de la rive droite du fleuve Niger (Niger). *Dipl. 3ème Cycle CHYN, 13p., 4 tabl., 4 ann. (décembre 1992).*

## Extrait du Curriculum Vitae

*Dr. Abdelkader Dodo*  
*Département de Géologie*  
*Université de Niamey*  
*Boîte postale 10662*  
*Niamey (Niger)*  
*Tél : (00227)733330*  
*Fax : (00227)732313*

*(Précédemment)*  
*Centre d'Hydrogéologie*  
*Université de Neuchâtel*  
*Rue Emile-Argand 11,*  
*CH-2007 Neuchâtel*  
*Tél : (004138)256434*  
*Fax : (004138)242695*

Abdelkader Dodo obtained his Diploma in Engineering Geology in 1986 and B. Sc. degree 1983 from the Institute of Geology and Mineralogy at The Geneva University, Switzerland, and his Numerical Calculation Certificate in 1984. He received his M. Sc. degree in 1987 and D. Sc. (Ph. D) degree in 1992 in groundwater hydrogeology from the Center of Hydrogeology at The Neuchâtel University, Switzerland.

His research interests include hydrogeology of great sedimentary basins, study of aquifers in fractured media, groundwater deep flow, the contribution of paleolimnology in the recharge of aquifers, groundwater mapping, numerical modeling of groundwater flow and water resources management in developing countries.

He has published several scientific papers related to such topics as flow in porous and fractured media, groundwater mapping.

He is member of The International Association of Hydrogeologists AIH. Presently, he leave at the Department of Geology at The Niamey University, Niger, for teaching courses.

---

Abdelkader Dodo a obtenu son diplôme d'Ingénieur-Géologue en 1986 à l'Institut de Géologie et de Minéralogie et son Certificat de calcul numérique en 1983 à l'Université de Genève, Suisse. Il a reçu son diplôme post-grade de 3ème cycle en 1987 et son doctorat ès Sciences en 1992 en hydrogéologie au Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, Suisse.

Ses domaines de recherches englobent l'hydrogéologie des grands bassins sédimentaires, les aquifères fracturés, les circulations profondes des eaux souterraines, la contribution de la paléolimnologie dans la recharge des aquifères, la cartographie hydrogéologique, la simulation numérique des écoulements souterrains et la gestion des ressources en eau.

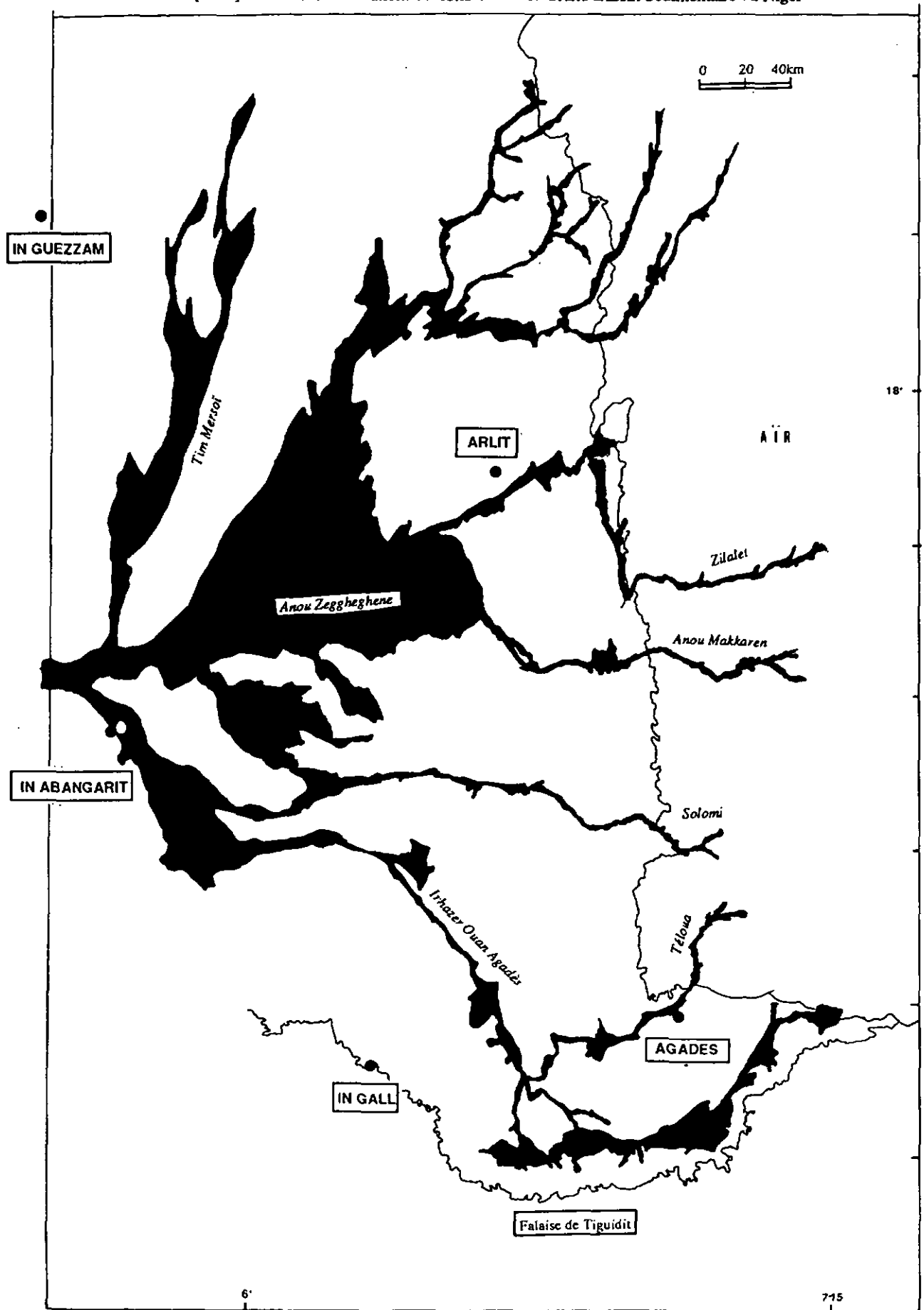
Il a publié plusieurs articles notamment sur les circulations profondes dans le grand bassin sédimentaire du Niger, les écoulements souterrains en milieux continus et fracturés, la cartographie hydrogéologique.

Il est membre de l'Association Internationale des Hydrogéologues AIH. Actuellement, il est enseignant au Département de Géologie de l'Université de Niamey, Niger.

Neuchâtel, le 21 Décembre 1992.

- DODO A., BOUZELBOUDJEN M. (1993). Le grand bassin sédimentaire du Niger : Etat des connaissances. (en cours). *Bull. BRGM, Hydrogéologie*, (en cours).
- DODO A., BOUZELBOUDJEN M. (1993). Carte hydrogéologique du bassin du Niger (Aquifères du Groupe des grès d'Agadès) au 1:500000 + Notice explicative 20p. *Edition OACT-PCHIA*. (à paraître).
- DODO A., BOUZELBOUDJEN M., MARGAT J. (1993). Hydrodynamics of Niger sedimentary basin. *Journal of Hydrology*. (en cours).
- DODO A., FONTES J.-Ch. (1993). Etude géochimique et isotopique dans le bassin de Tin Séririne. *Water Resources Research*, (en cours).
- DODO A. (1992). Etude des circulations profondes dans le grand bassin sédimentaire du Niger - Identification des aquifères et compréhension de leurs fonctionnements. *Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel*, 101p., 44fig., 15 ann.
- ANDREWS J.N., FONTES J.-C., ARANYOSSY J.F., DODO A., EDMUNDS M.W., TRAVI Y. (1993). The evolution of alkaline groundwaters in the Continental intercalaire aquifer of the Irhazer Plain, Niger. *Water Resources Research*, 25p. (à paraître).
- GALBANE A., BOUZELBOUDJEN M., DODO A., ZWAHLEN F. (1992). Hydrogéologie des roches fissurées en pays cristallin- Centre-Est du Burkina Faso. *5ème colloque international d'Hydrologie en pays calcaire et en milieu fissuré, Neuchâtel - Suisse, 16-18 Octobre 1992. Annales scientifiques de l'Université de Besançon. Géologie - Mémoires Hors-Série, N° 11 - 1992, Tome 1, pp. 51-56.*
- OUSSEINI B., BOUZELBOUDJEN M., DODO A., ZWAHLEN F. (1992). Circulations profondes des eaux du Continental terminal (Niger). *Bull. Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, N°11, 1992.*, 11p., 9fig.
- DODO A., BOUZELBOUDJEN M. (1992). Eléments pour la carte hydrogéologique du bassin de l'Irhazer, Niger. *Bull. BRGM, Hydrogéologie, N°1-2, 1992*, pp. 59-68, 7fig., 1ann.
- DODO A., BOUZELBOUDJEN M., SAFAR-ZITOUN M., ZWAHLEN F. (1991). Carte hydrogéologique du bassin sédimentaire de l'Irhazer (sud Hoggar, ouest Aïr) au 1:500'000. - Epreuve d'essai. *Quatrième Réunion d'Experts OACT-PCHIA (Organisation Africaine de Cartographie et de Télédétection - Programme de Cartographie Hydrogéologique Internationale de l'Afrique). Nairobi du 13 au 17 mars 1991.* 6p.
- DODO A., BOUZELBOUDJEN M. (1990). Place du bassin sédimentaire de Tin Séririne-Irhazer dans son contexte hydrogéologique régional du Sahara Central Méridional (Hoggar, Aïr). *Bulletin Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (CHYN), N° 9.* pp49-65. 7 figures. 8 tableaux.
- DODO A. (1990). Aperçu hydrogéologique des aquifères du bassin de l'Irhazer. *Réunion de travail à l'Institut Universitaire d'Etudes du Développement (IUED) à Genève dans le cadre du Programme Hydraulique Niger-Suisse (PHNS).* Communication interne. 12p. 7 figures. 2 tableaux.
- DODO A. (1989). Sur les rôles hydrogéologiques des failles dans les vallées du Sud de l'Aïr (République du Niger). *Séminaire International sur "l'Etat de l'art en Hydrologie et en Hydrogéologie dans les pays arides et semi-arides d'Afrique". Ouagadougou - Burkina Faso.* pp636-648.
- DODO A. (1988). Paléorecharge et recharge actuelle des aquifères primaires et secondaires de la plaine de l'Irhazer-Tim Mersoï. *Conférence Internationale de Marseille sur "l'évolution passée et future des déserts" dans le cadre du Programme International sur les Corrélations Géologiques (PICG) de l'UNESCO.* Journal PICG 252.
- SCHROETER P., JOSEPH A., DODO A. (1997). Etude hydrochimique et isotopique dans l'Aïr, le Ténére du Tafassasset et le Kaouar. *Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement et Université de Niamey, Département de Géologie.* Rapport interne.
- BALMER F., DODO A., NOMA I. (1997). Contribution à la connaissance de la situation hydraulique de la ville d'Agadès et de sa région. *Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement. Direction Départementale de l'Hydraulique d'Agadès. MRAIH, DDH-Agadès.* Rapport interne.
- DODO A. (1986). Etude hydrogéologique des vallées de Tchinn Tabisguin, Awagadi et Al Raslin (Région d'Agadès - Niger). *Mémoire du Diplôme de Troisième Cycle au Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel.* 70p. 24 figures. 9 tableaux. 10 planches. 1 carte au 1:67000. Annexes.
- DODO A. (1985). 1. - Cartographie au 1:5000 et étude pétrographique du secteur délimité par le bois du Prarial, la Crête de la Replatte, le Rocher de l'Aigle et le vallon de la Doire (Ophiolites du Montgenèvre, Hautes-Alpes, France). 23p. 6fig., 1 carte. 2.- "Etude des minéralisations associées à l'Ophiolite du Montgenèvre (Hautes-Alpes France, Province de Turin Italie)". 31p. 27 figures. *Diplôme d'Ingénieur-Géologue. Institut de Géologie et de Minéralogie, Université de Genève.*

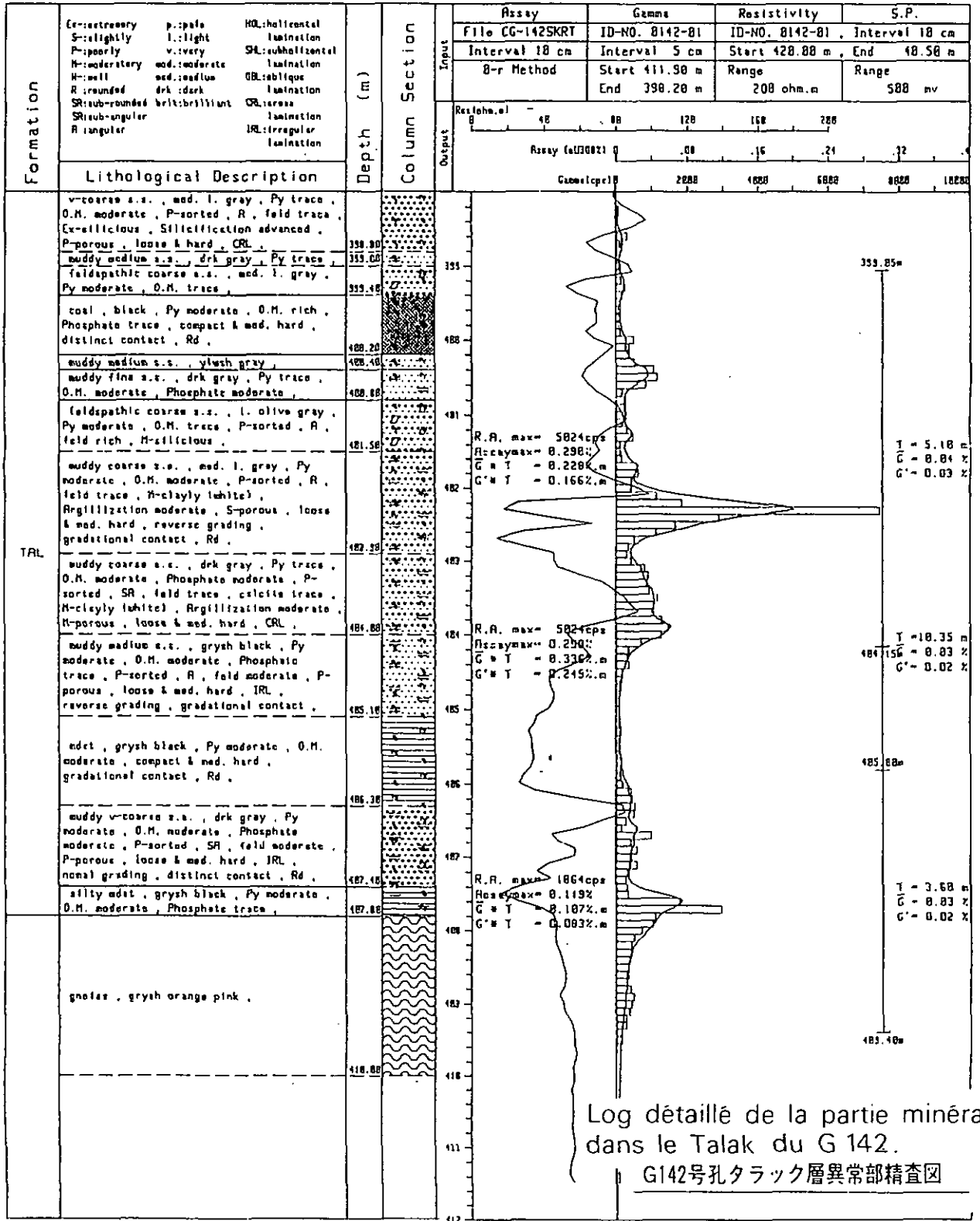
*Annexes*



A. 1.: Réseau hydrographique dans les sous-bassins de Tin Séririne et d'Irhazer.

DODO A. [1992] : Etude des Circulations Profondes dans le Grand Bassin Sédimentaire du Niger

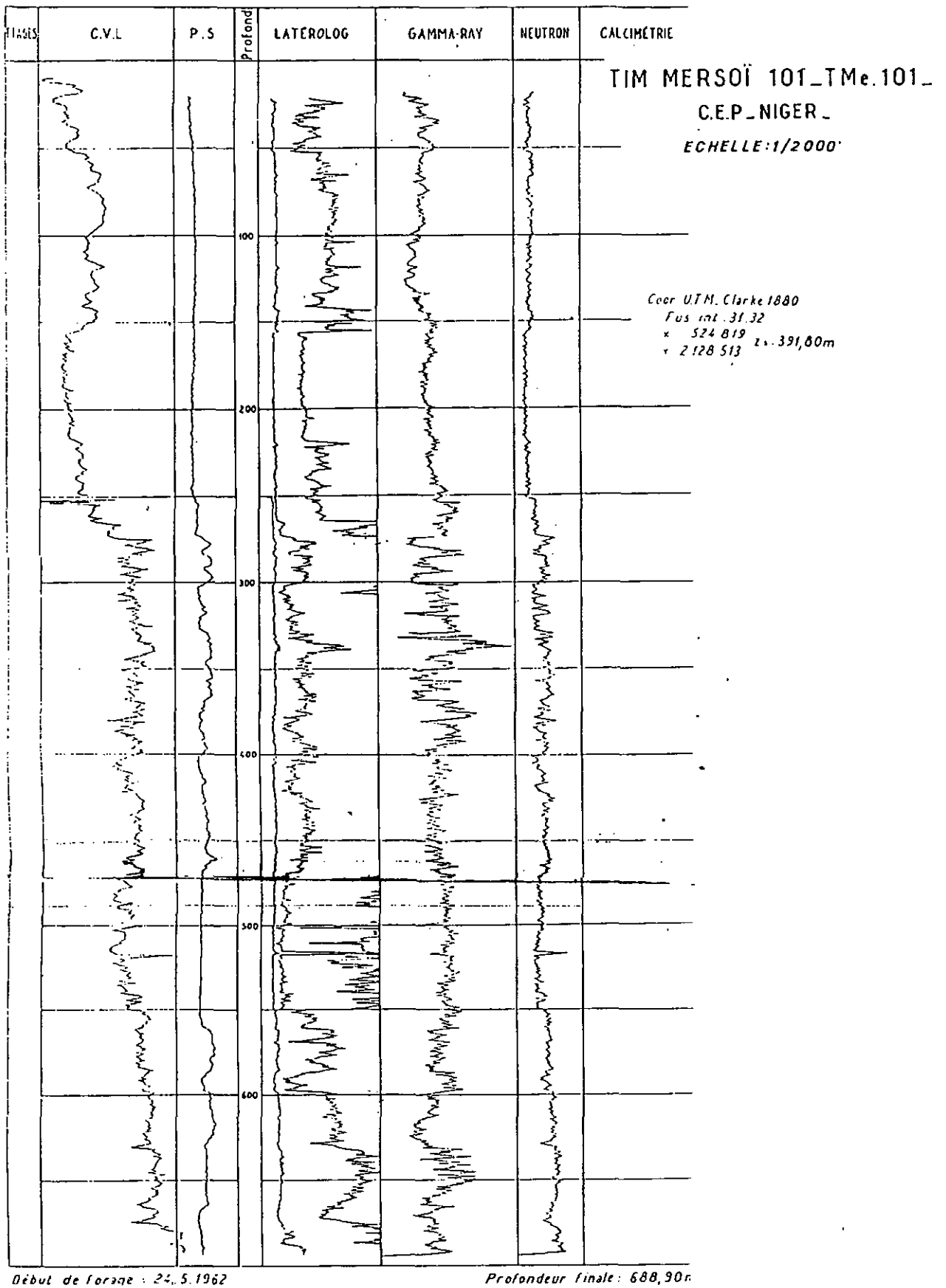
Location	NIGER Sekiret	Drilling Depth	420.00 m	Core drilling		Logging speed	1.0 cm/sec
Hole No.	G-142	Logging Depth	420.00 m	K-factor	8.00005055	Azimuth	
Grid No.	D2-21-1	Casing	GP: 0.0- 5.3 m	Probe Monitor	GL-3100D	Inclination	-90 degs
Date logged	05.1.25			Detector	NO.01D01	Chemist	Hasahiro Tsuru
(X,Y)	29663 , -7356	Holesize	ND: 0.0-420.6 m	Back ground	10.00	Interpreter	Hasahiro Tsuru
Elevation	502.44 m			Discrimination	0.1MeV	Geologist	RLJ
Water Level	40.00 m			Test Piece	Cs-5-3550	Log oprtr	SUSUKY&OGATA



Log détaillé de la partie minéralisée dans le Talak du G 142.

G142号孔タラック層異常部精査図

A. 2.1 : Exemple de dossier de forages.



A. 2.1 (suite) : Exemple de dossier de forages.

**Cota du mur (en mètres) de la formation paléozoïque traversée**  
(Ces données ont servi à élaborer les schémas d'écoulement en coupe)

	158	158	160	161	162	163	272	184	185	186
Irhazer	-144.45	-	-34.00	-	-	25.00	-	3.20	-	-
T2	-	-	-	-	-	-	-	36.00	-	-
Abinky	-	-	-	-	-	-	-	55.00	-	-
T1	-	-	-	-	-	-	-	100.40	-	-
Mous.	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
TL	-	-	-	-	-	-	-	x	-	64.70
Perm. 1	-	-	-	-	-	-	-	x	-	93.30
Perm. 2	-	-	-	-	-	-50.00	223.30	x	9.70	x
Ar.-Mad.	-314.50	-	-	-	-	-58.00	103.30	x	94.30	x
TR	-514.45	241.80	-45.00	-	-	x	-56.80	x	94.50	x
Tchinéz.	-	-	-	-	-	x	-136.77	x	98.20	x
Guez	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x
Talak	-674.95	117.80	-219.00	335.00	-	x	x	x	x	x
FZ	-764.45	-33.20	-359.00	99.00	277.00	x	x	x	x	x
Dév. MS	x	-169.20	-385.50	-22.50	236.00	x	x	x	x	x
DI	x	-272.20	-407.00	-169.00	9.00	x	x	x	x	x
Goth	x	x	-450.00	-280.00	-102.00	x	x	x	x	x
CO	x	x	x	-719.00	-119.90	x	x	x	x	x

A. 2.2 : Collecte des données et extrait de la banque des données sur dBase III+. (-) formation absente ; (x) formation non atteinte par le forage.

**Potentiel hydraulique (en mètres) de chaque réservoir paléozoïque capté**  
 (Ces données ont servi à élaborer les schémas d'écoulement en coupe)

	TR	FZ	DI	CO
158	390.00	-	-	-
159	-	400.80	420.10	-
160	-	400.10	403.16	-
161	-	413.40	440.20	444.80
162	-	-	-	432.80
272	395.20	-	-	-
185	484.25	-	-	-

A. 2.2 (suite 1) : Collecte des données et extrait de la banque des données sur dBase III+. (-)  
 formation non testée.

**Cote du mur (en mètres) des formations mésozoïques**  
(Ces données ont servi à élaborer les schémas d'écoulement en coupe)

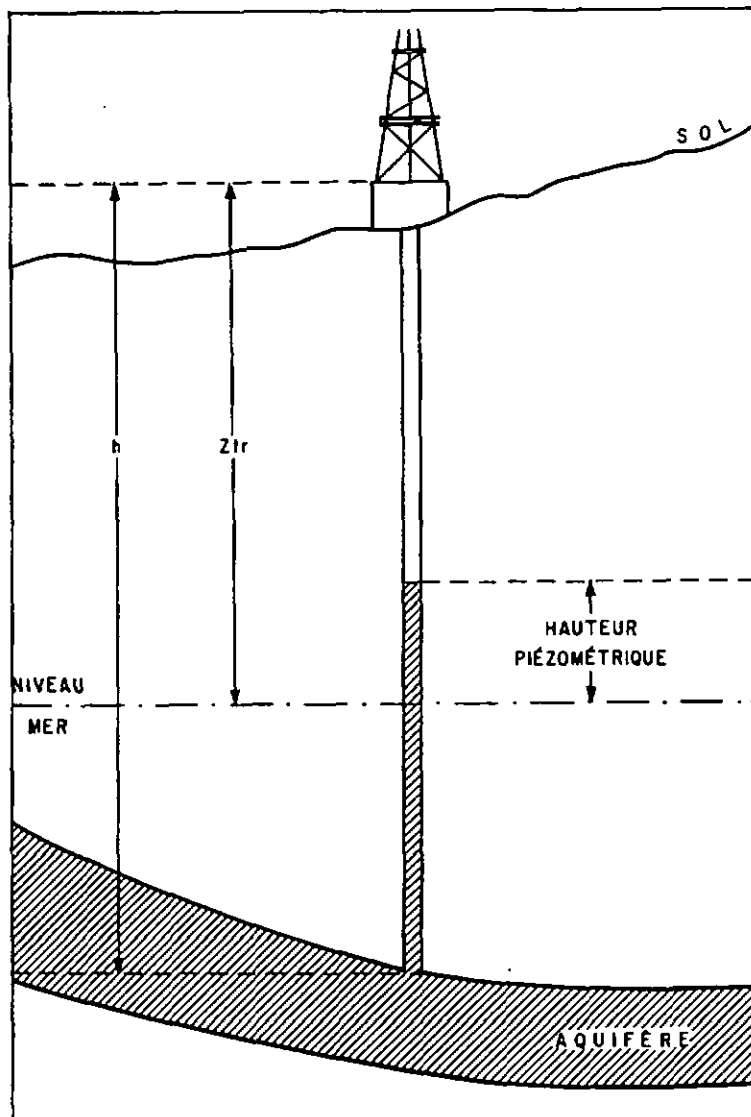
	CI	irhezer	T 2	Abinky	TL + T 1	Achekl	Permien
23	-	378.41	326.40	283.61	131.21	-	-
86	-	324.50	259.00	197.00	126.00	-	-
2	-	290.53	271.53	182.53	139.53	-	< 67.53
93	-	242.50	-	181.50	48.70	-	< 28.00
66	-	150.00	-	69.50	-	-	< 51.50
38	-	243.10	-	-	-	-	196.00
68	-	124.70	-	-	-16.33	x	x
143	-	281.80	-	-	52.00	x	x
142	-	358.50	335.00	297.70	225.00	82.20	x
155	-	260.30	210.30	x	x	x	x
147	-	338.00	232.00	x	x	x	x
146	-	273.00	265.00	x	x	x	x
490	380.00	x	x	x	x	x	x
471	319.00	x	x	x	x	x	x
502	401.00	x	x	x	x	x	x
458	311.00	x	x	x	x	x	x
476	< 145.00	x	x	x	x	x	x
477	< -50.00	x	x	x	x	x	x
478	< -352.00	x	x	x	x	x	x

A. 2.2 (suite 2) : Collecte des données et extrait de la banque des données sur dBase III+.-(-)  
formation absente ; (x) formation non atteinte par le forage.

**Potentiel hydraulique (en mètres) de chaque réservoir mésozoïque capté**  
 (Ces données ont servi à élaborer les schémas d'écoulement en coupe)

	CI	T 2	T 1 + TL
184	-	-	448.17
23	-	421.90	-
86	-	-	418.00
2	-	410.66	-
93	-	-	406.74
66	-	-	400.00
38	-	-	390.50
68	-	-	392.55
142	-	-	403.00
143	-	-	394.86
146	-	-	454.50
147	-	-	453.00
155	-	-	407.50
502	476.00	-	-
458	384.65	-	-
490	466.65	-	-
471	434.80	-	-
476	322.14	-	-
477	311.90	-	-
478	298.00	-	-

A. 2.2 (suite 3) : Collecte des données et extrait de la banque des données sur dBase III+.  
 (-) formation non testée.



Si :  $h$  = cote de l'enregistreur par rapport à la table de rotation, exprimée en m,

$Z_{tr}$  = cote de la table de rotation exprimée en m,

$P$  = pression de fond stabilisée, exprimée en  $kg/cm^2$ ,

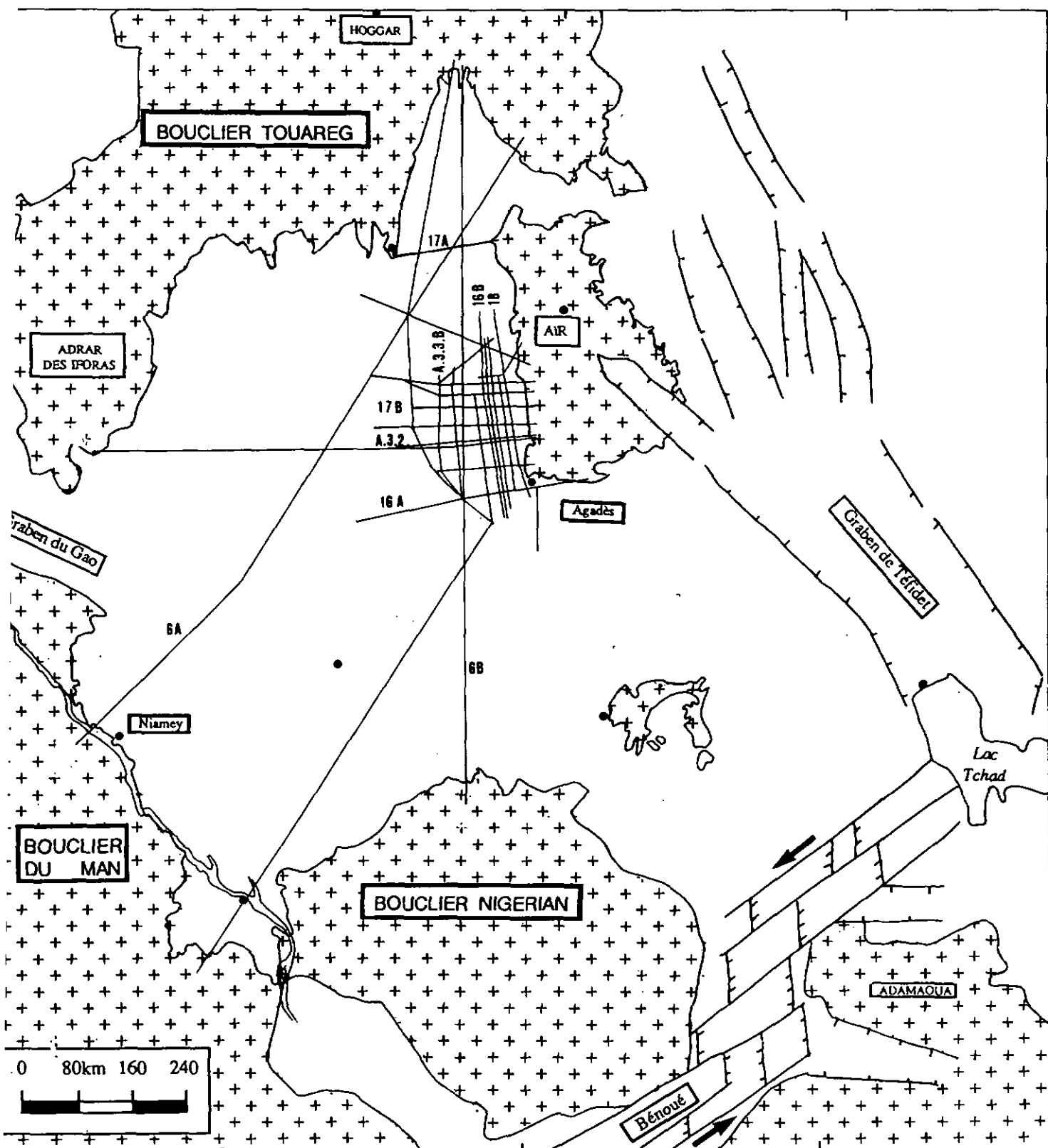
$d$  = densité de l'eau,

on a :

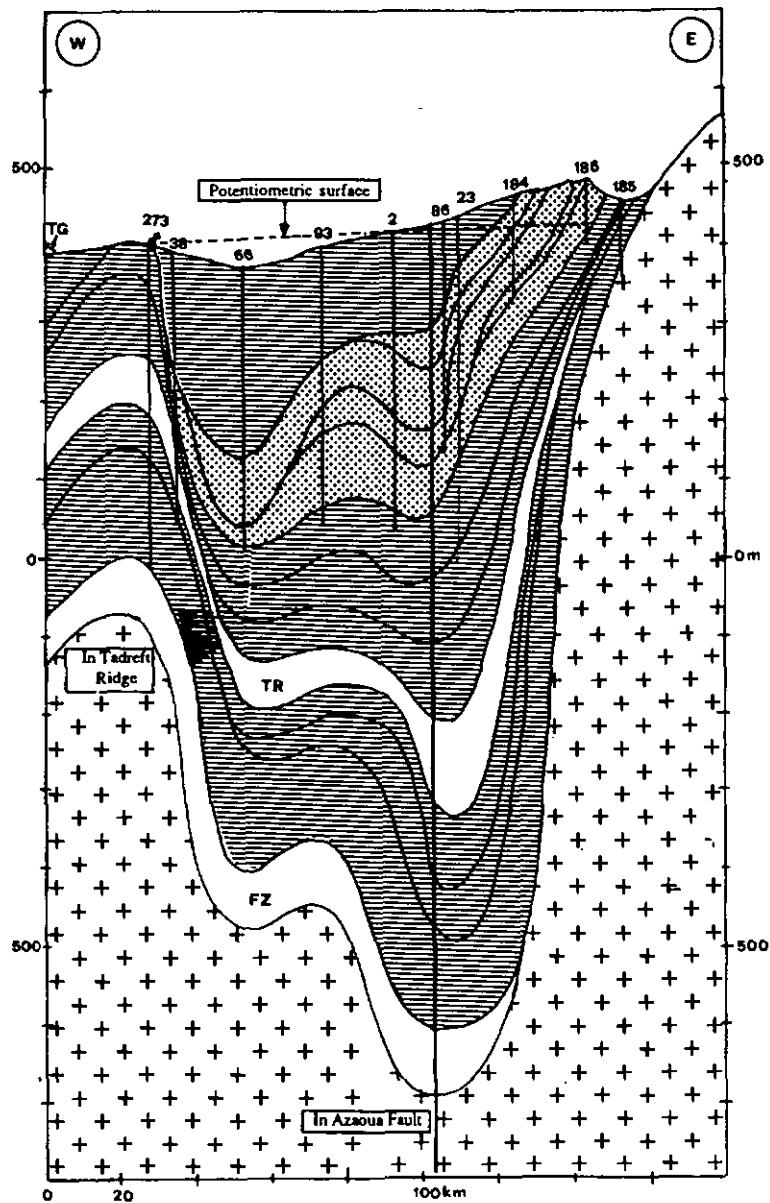
$$\text{hauteur piézométrique (en mètres)} = \frac{P \times 10}{d} + Z_{tr} - h$$

N.B. En prenant  $d = 1$ , on obtient la hauteur pseudopotentiométrique, équivalente en hauteur d'eau douce de la pression de couche.

A.2.3 : Calcul de la hauteur piézométrique d'un niveau aquifère (Technip, 1970).

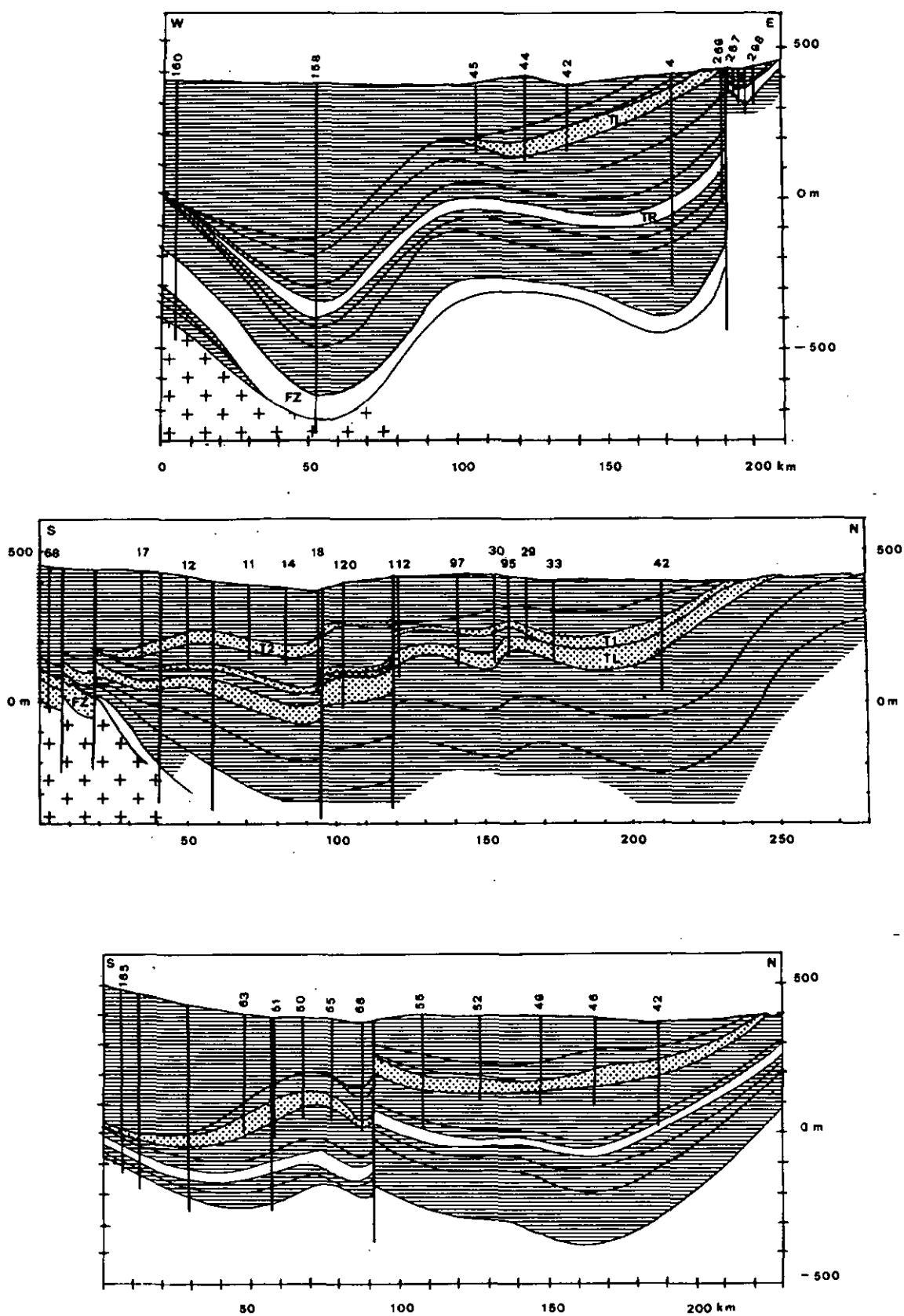


A. 3.1 : Situation des coupes dans le bassin du Niger. Les numéros renvoient aux figures et aux annexes.

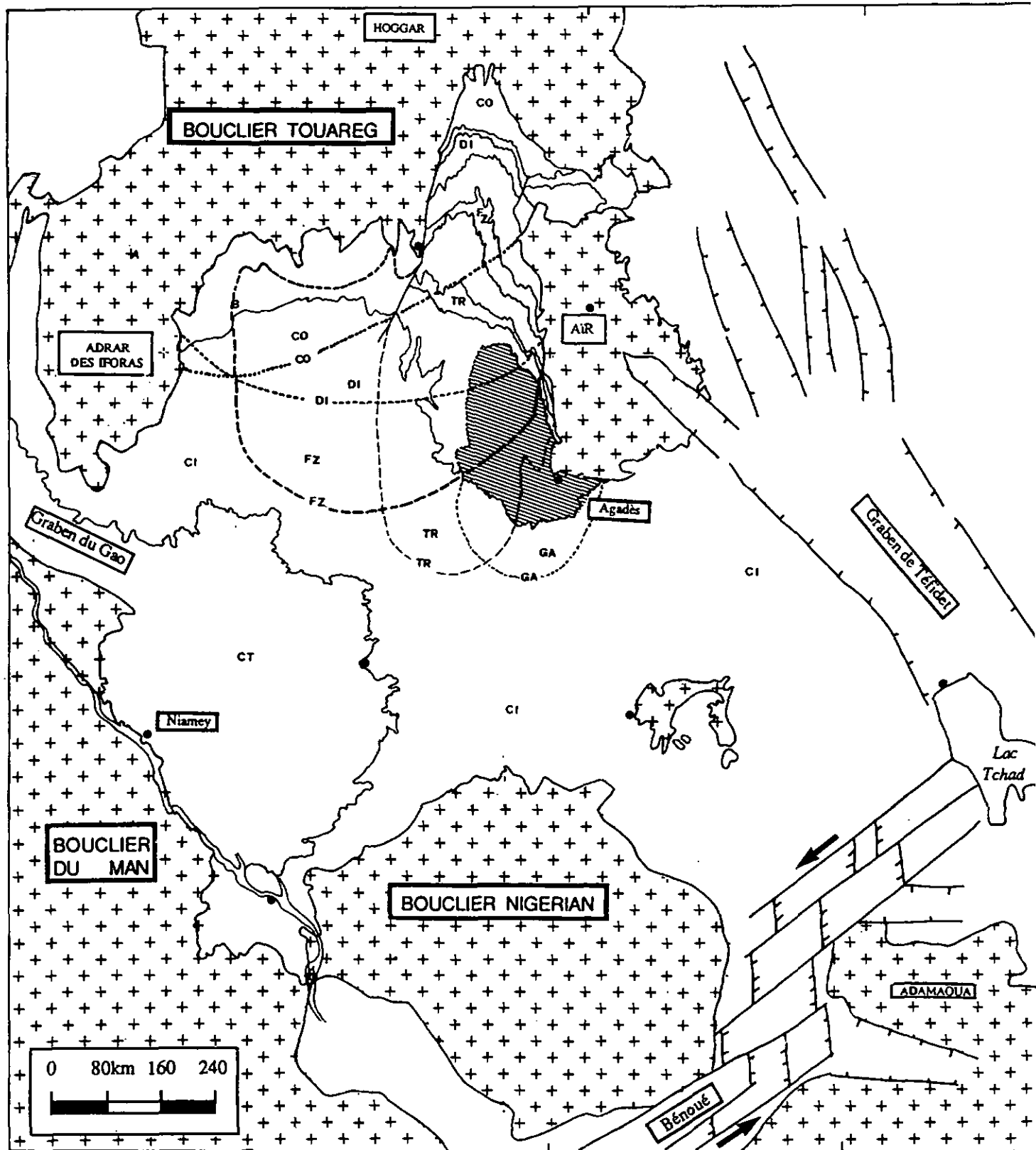


**Legend:** Agadès Aquifer. - Aquitard. - TG : Low cretaceous aquifer (Tégama). - TR : Namurian aquifer (Tarat). - FZ : Visean aquifer (Farrazékat). - 186 : Borehole. - - - Potentiometric surface of Agadès aquifer.

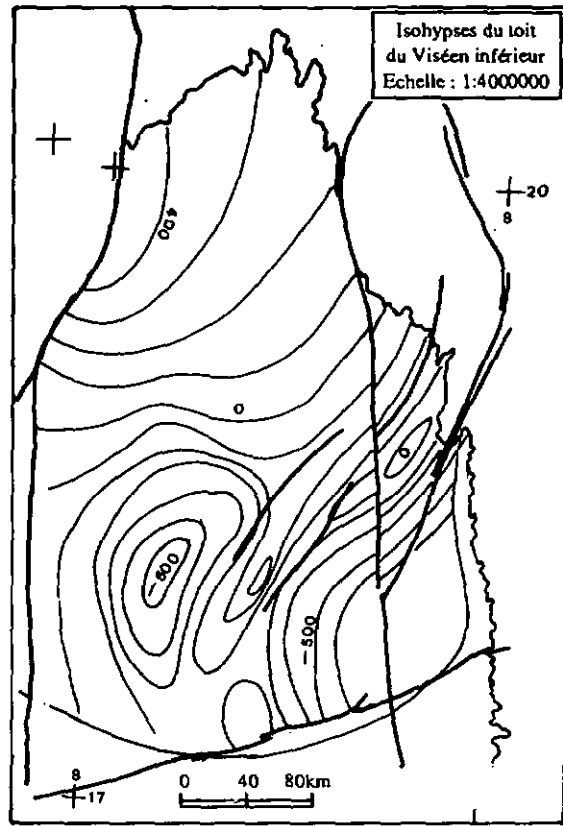
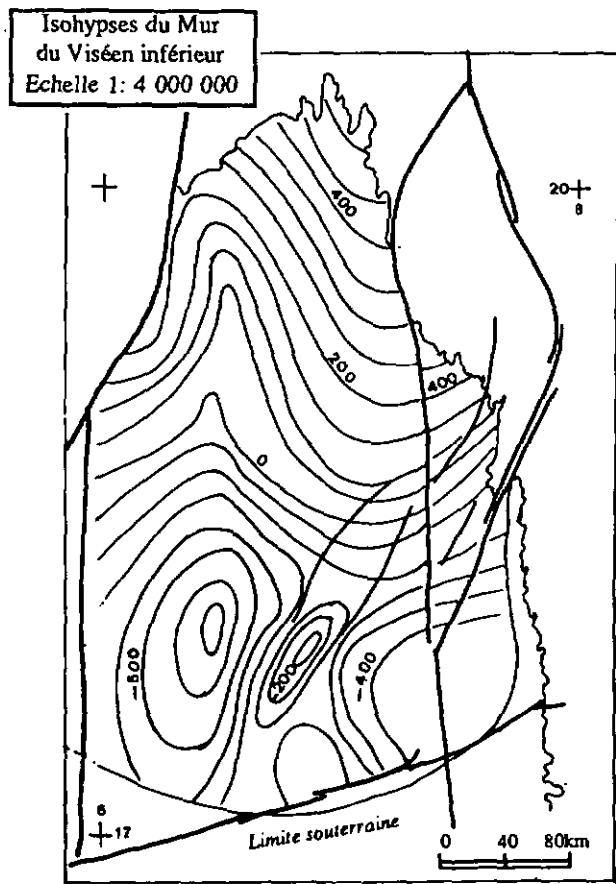
A. 3.2 : Coupe EW dans les sous-bassins de Tin Séririne - Irhazer : situation du Groupe des grès d'Agadès.



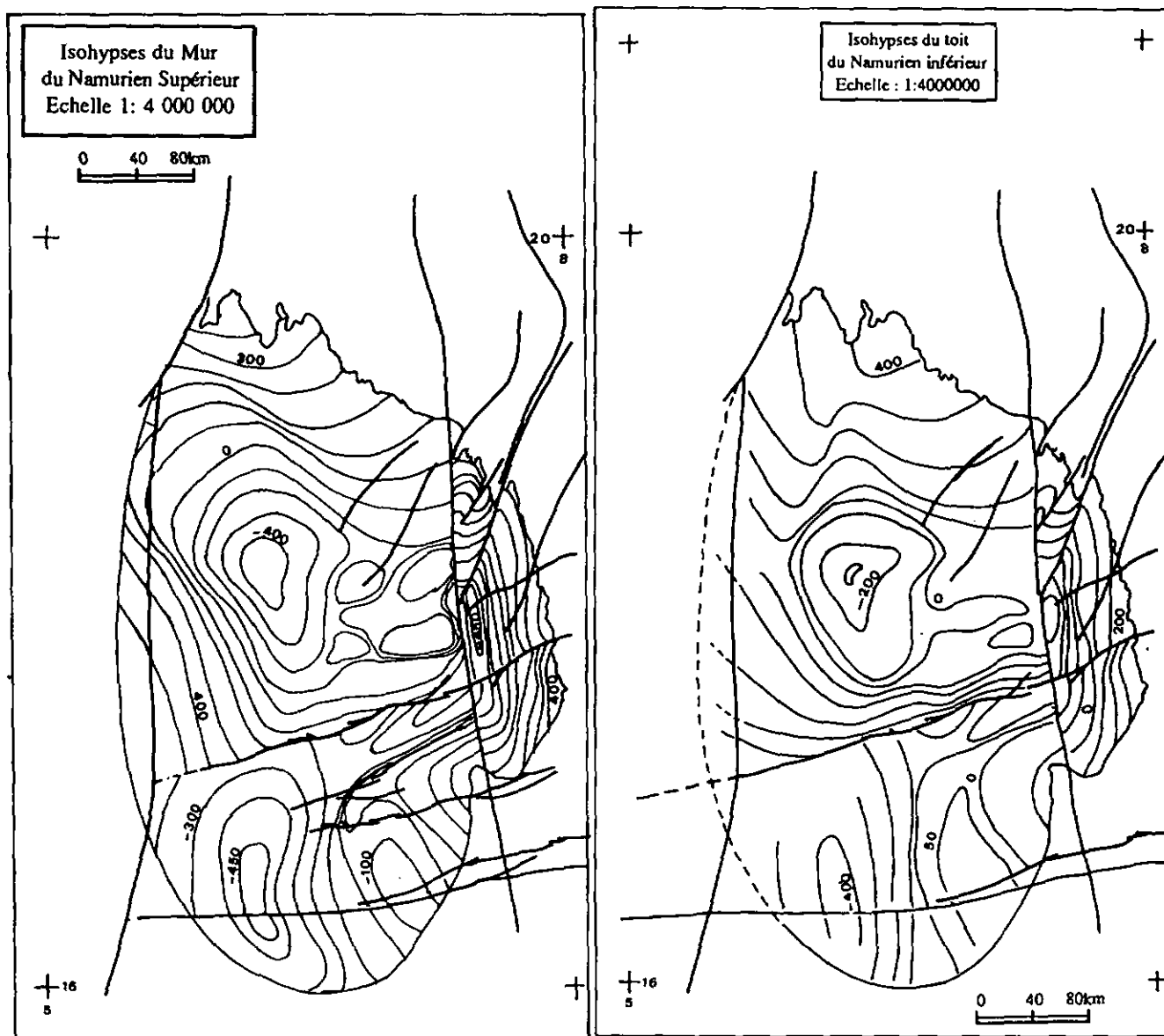
A. 3.3 : (A) - Coupe EW dans les sous-bassins de Tin Séririne - Irhazer : individualisation de "bassins" structuraux. (B) - Coupes NS dans les sous-bassins de Tin Séririne et d'Irhazer : zone d'exutoire des grès d'Agadès.(cf. figures 34 et 35).



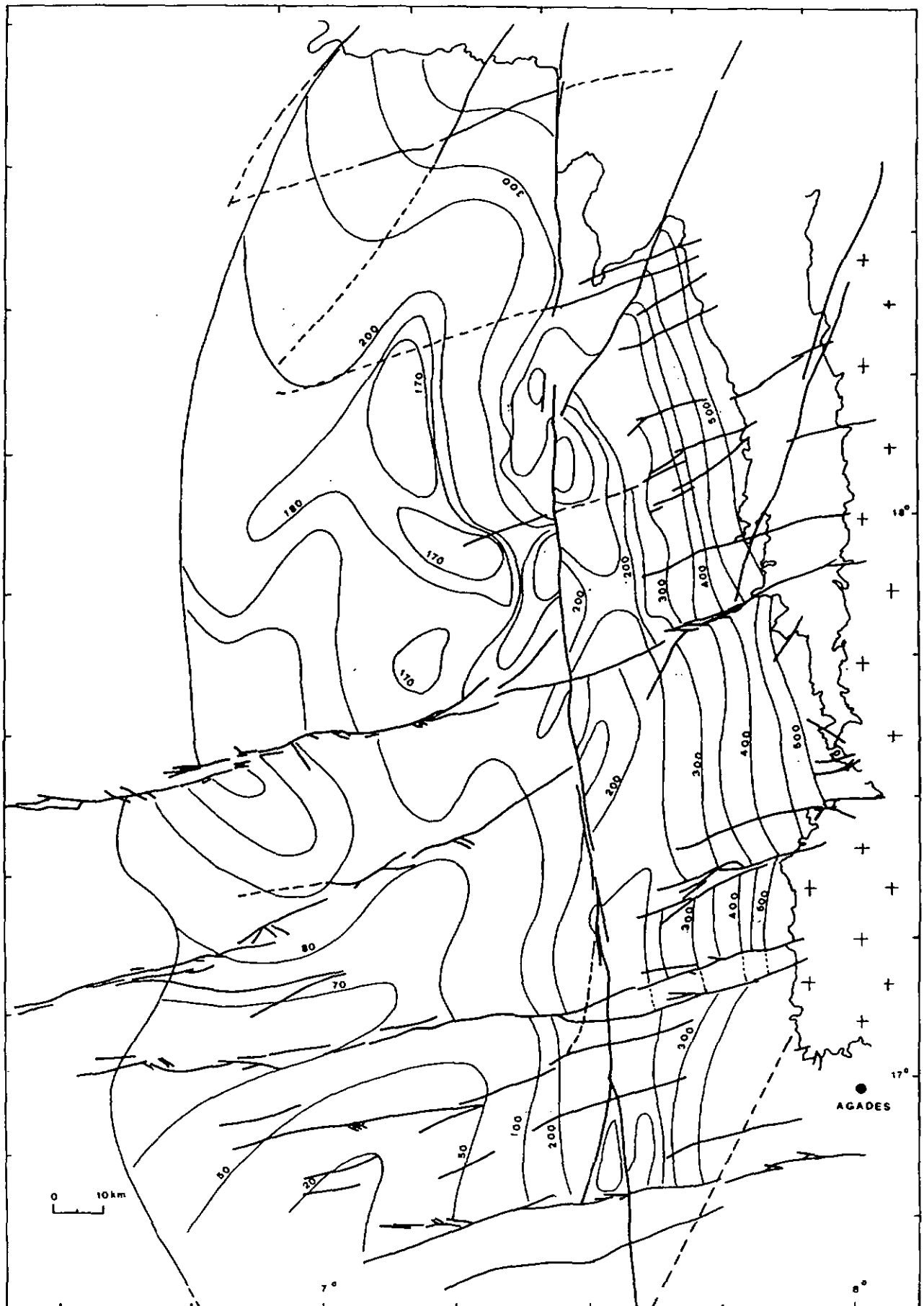
A. 4.1.: Limites d'extension des réservoirs aquifères dans le bassin du Niger : CO = Cambro-Ordovicien. DI = Dévonien inférieur. FZ = Viséen inférieur. TR = Namurien inférieur. GA = Groupe d'Agadès. CI = Continental intercalaire. CT = Continental terminal.



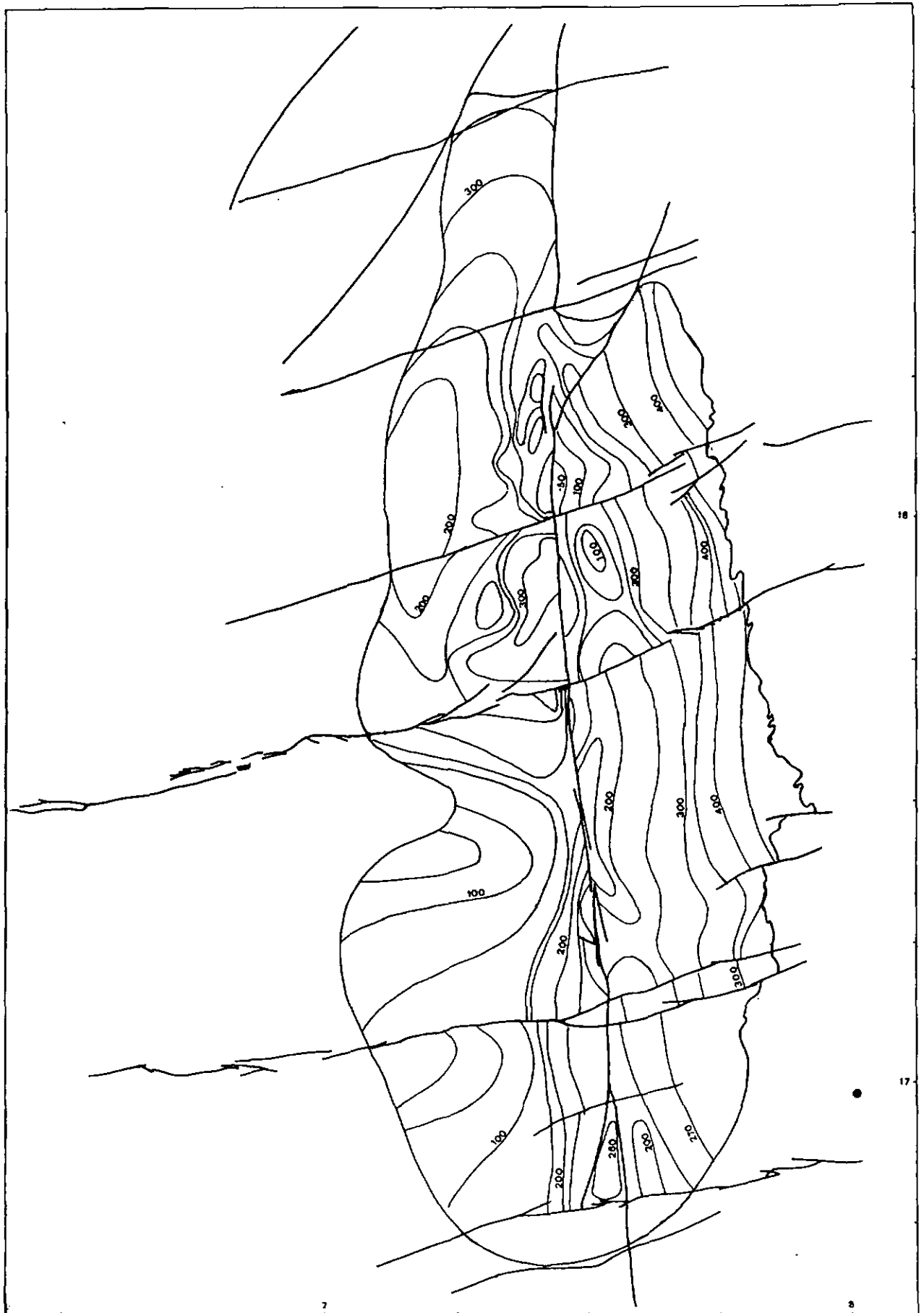
A. 4 .2 : Isohypes du mur et du toit de l'aquifère du Viséen inférieur (Farazékat).



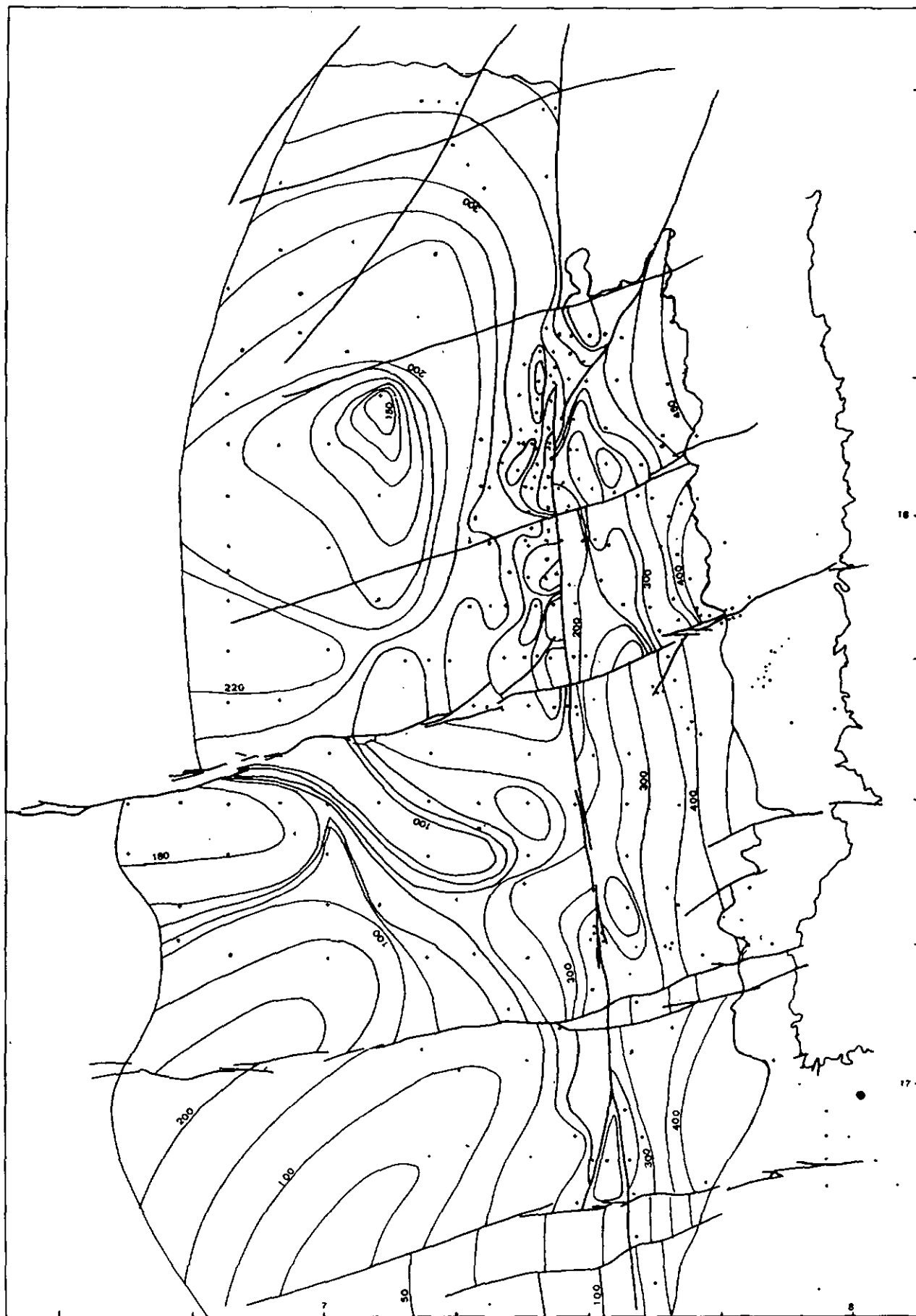
A. 5 : Isohypes du mur et du toit de l'aquifère du Namurien supérieur (Tarat).



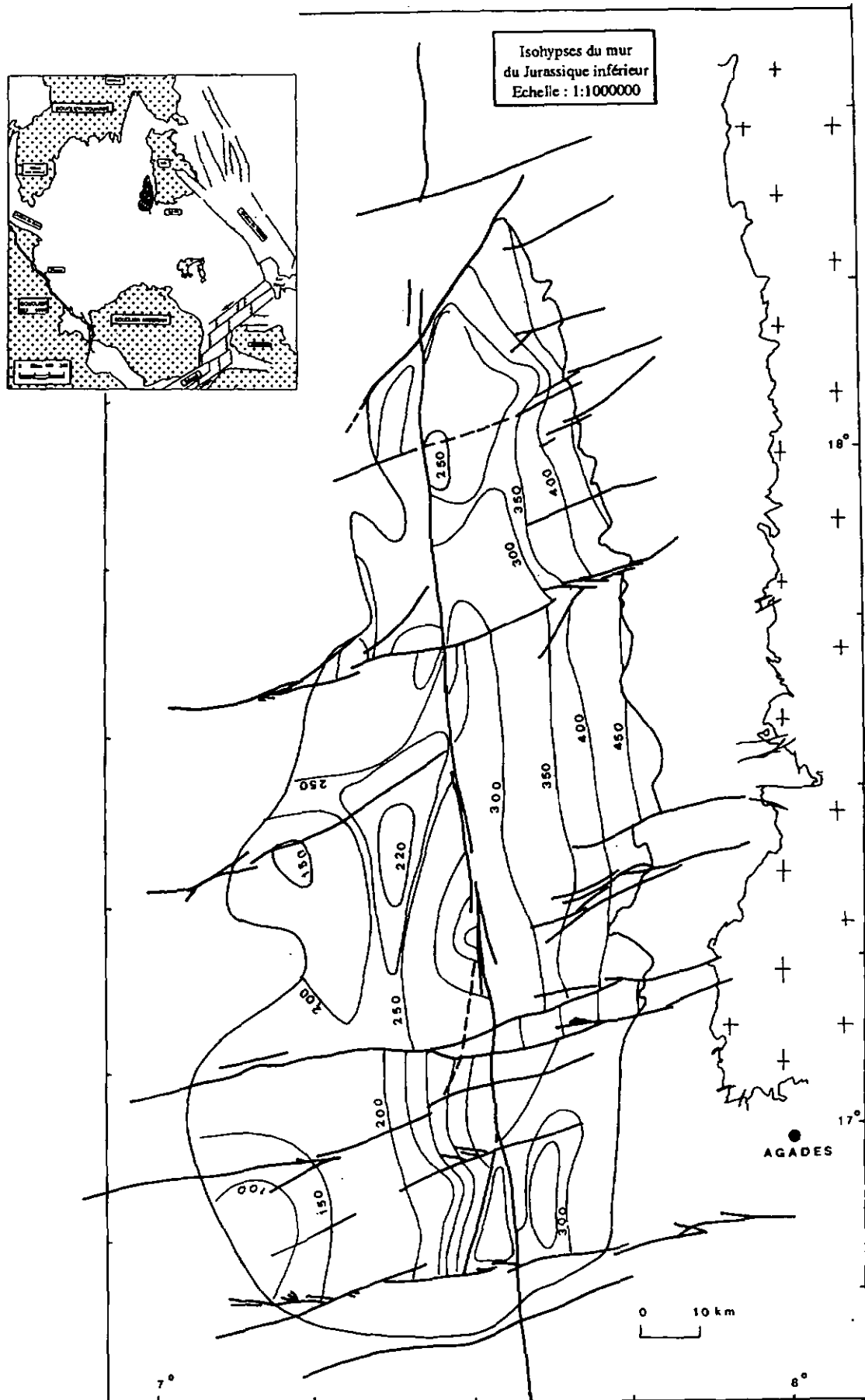
A. 6.1.: Isohypses du toit de l'aquifère du Trias (Téloua I II III).



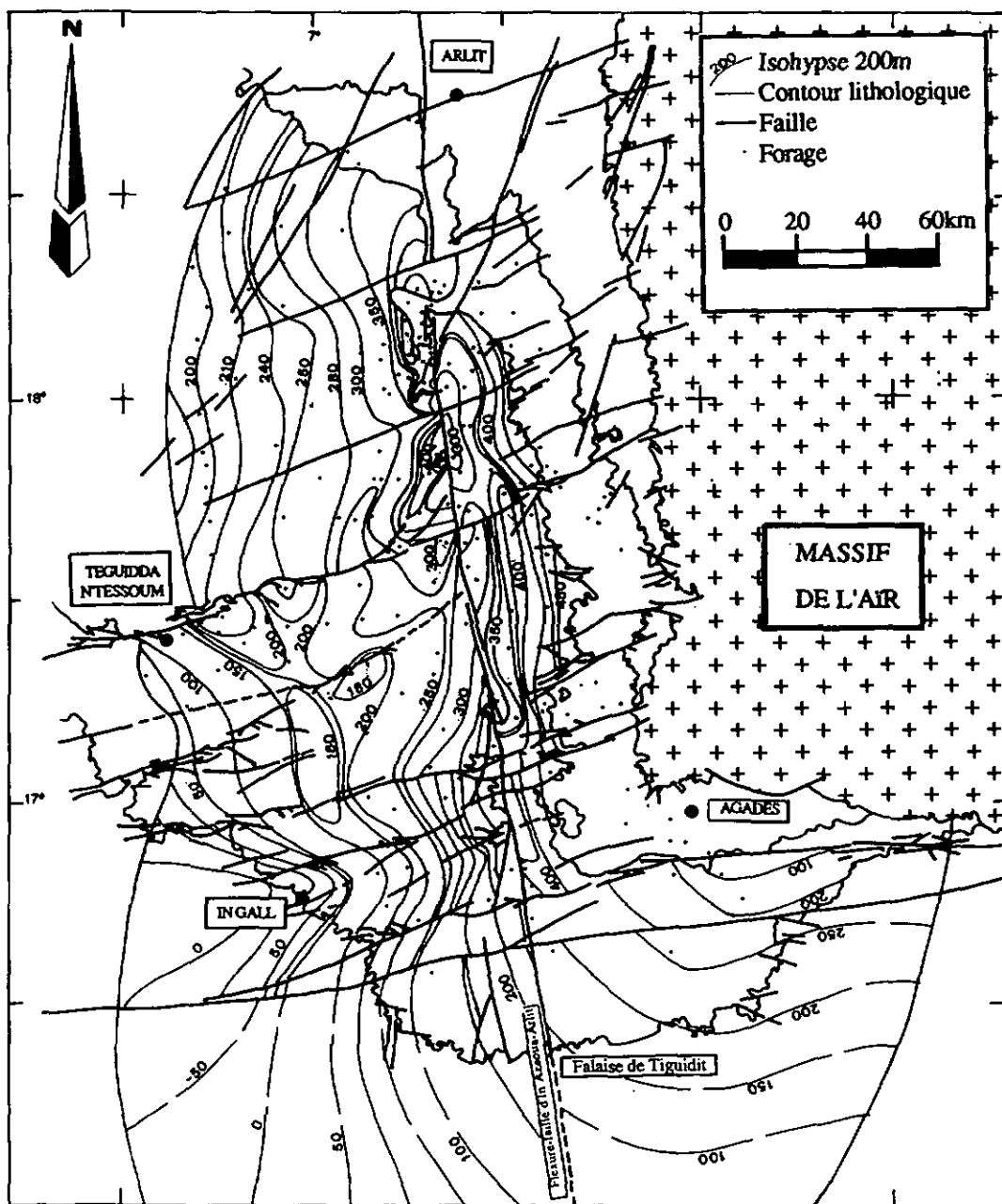
A. 6.2.: Isohypes du mur de l'aquifère du Jurassique inférieur (Tchirozérine I).



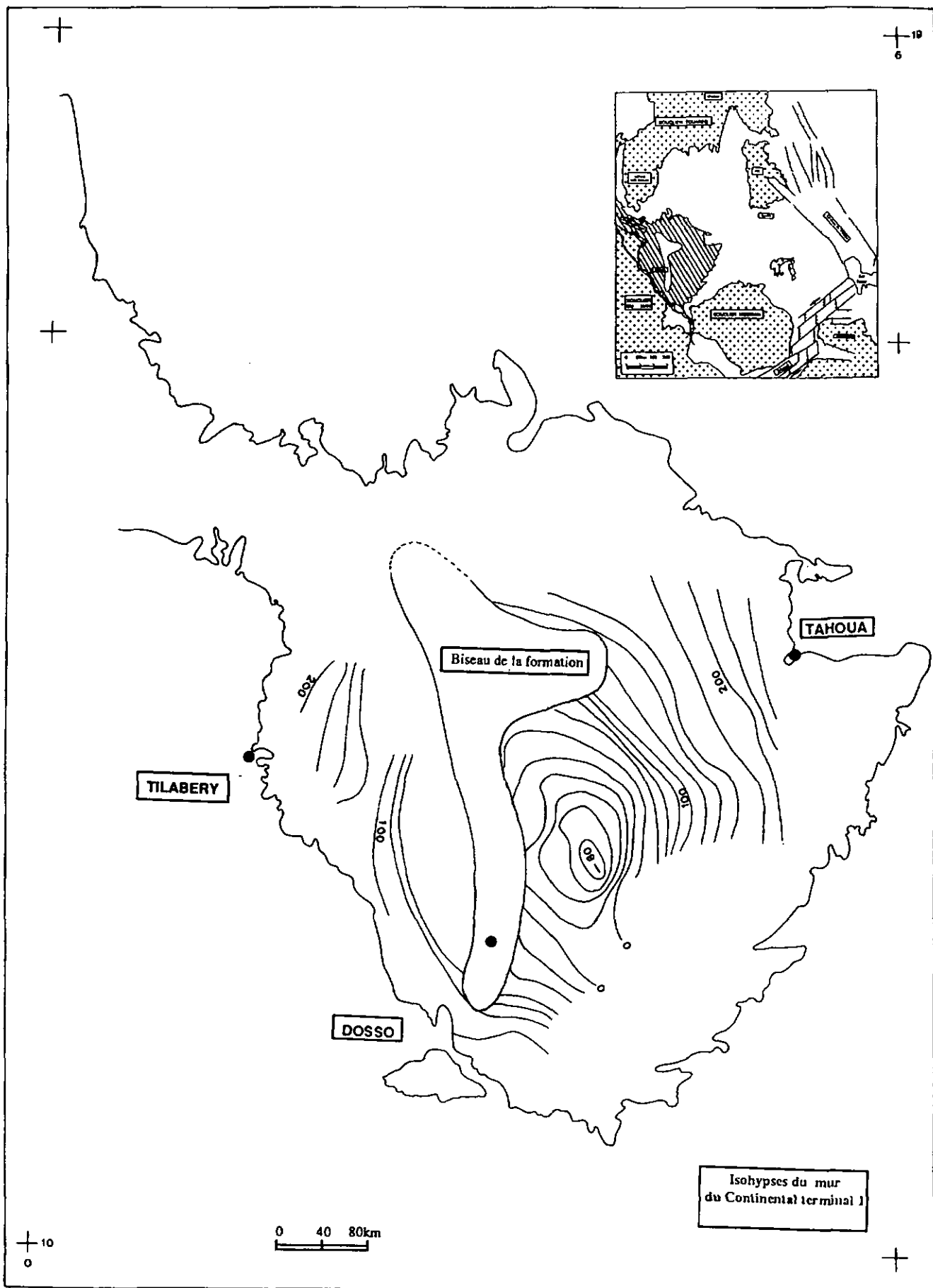
A. 6.3.: Isohypes du mur d'Abinky.



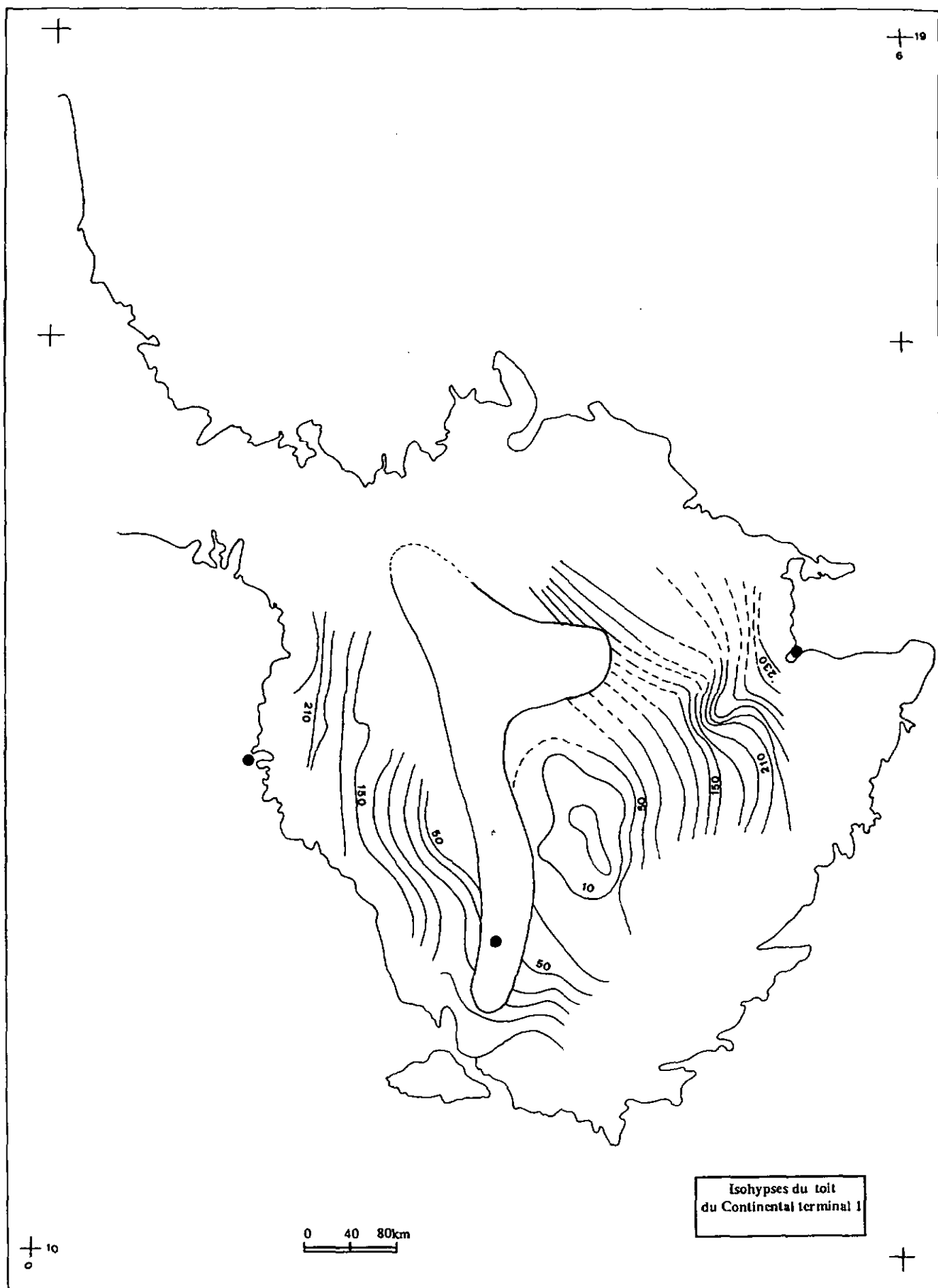
A. 6.4.: Isohypses du mur de l'aquifère du Jurassique supérieur (Tchirozérine II).



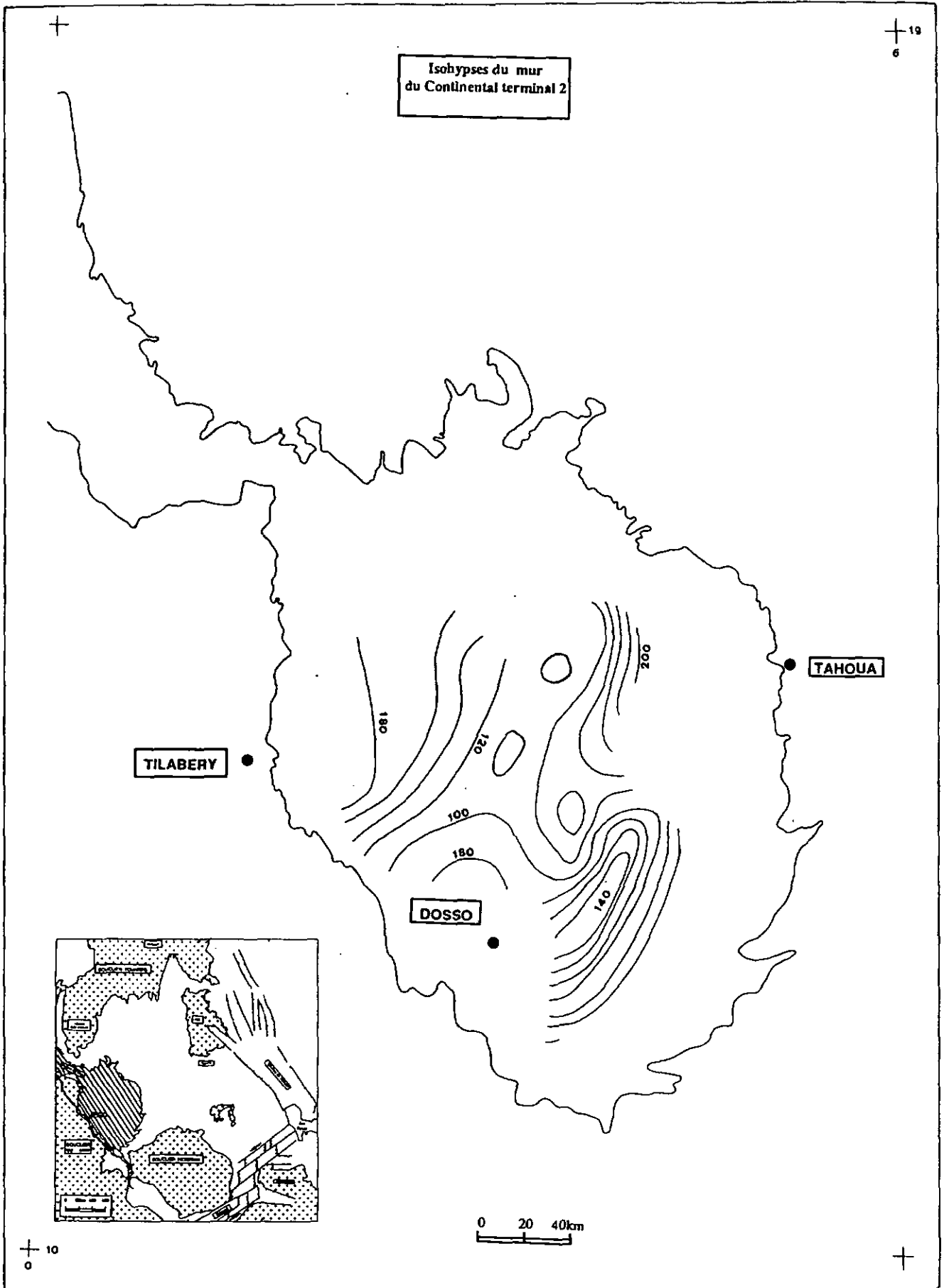
A. 6.5.: Isohypses du toit de l'aquifère du Jurassique supérieur (Tchirozérine II).



A. 7.1 : Isohypes du mur de l'aquifère du Continental Terminal I CT1 [d'après Bonnier, 1990].



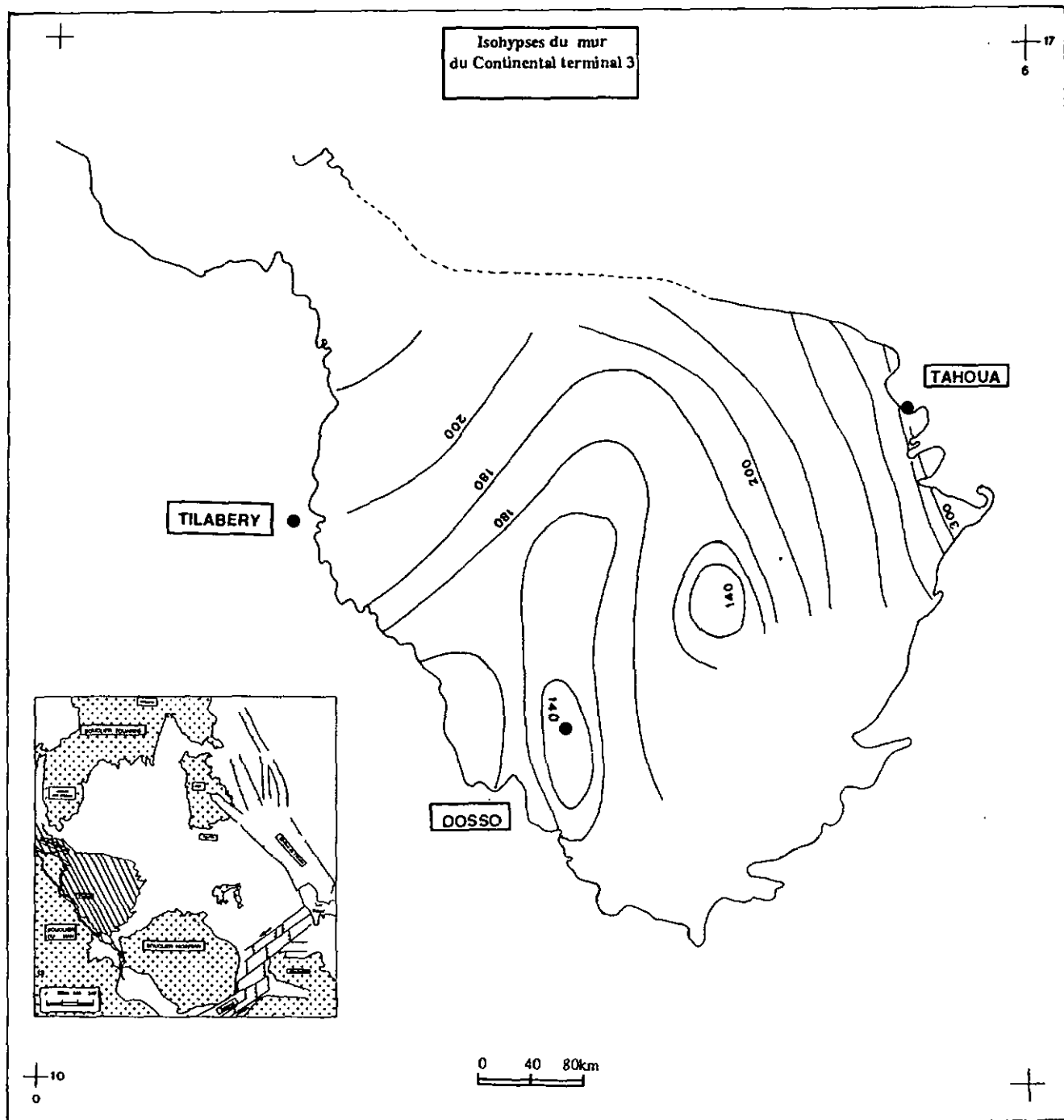
A. 7.2.: Isohypes du toit de l'aquifère du Continental Terminal 1 CT1 [d'après Bonnier, 1990].



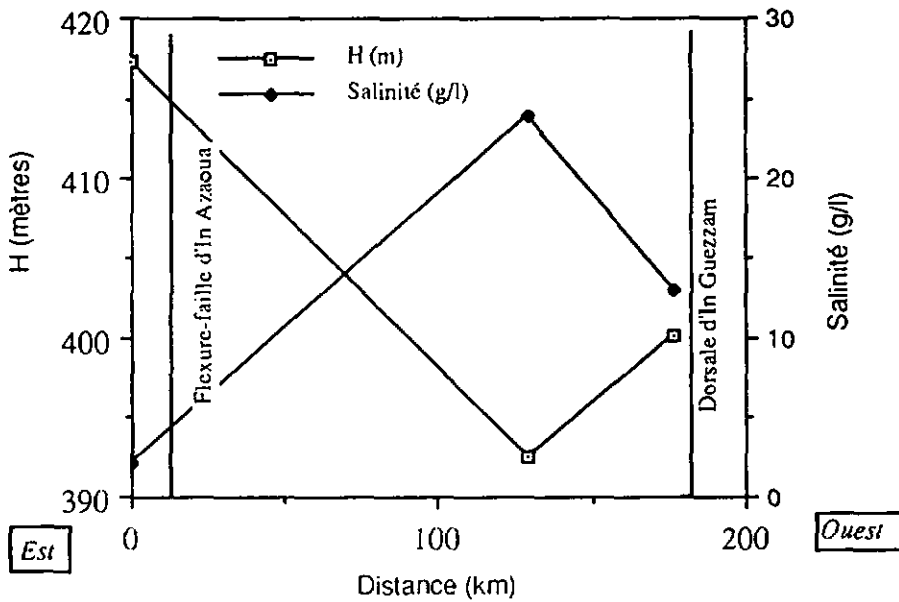
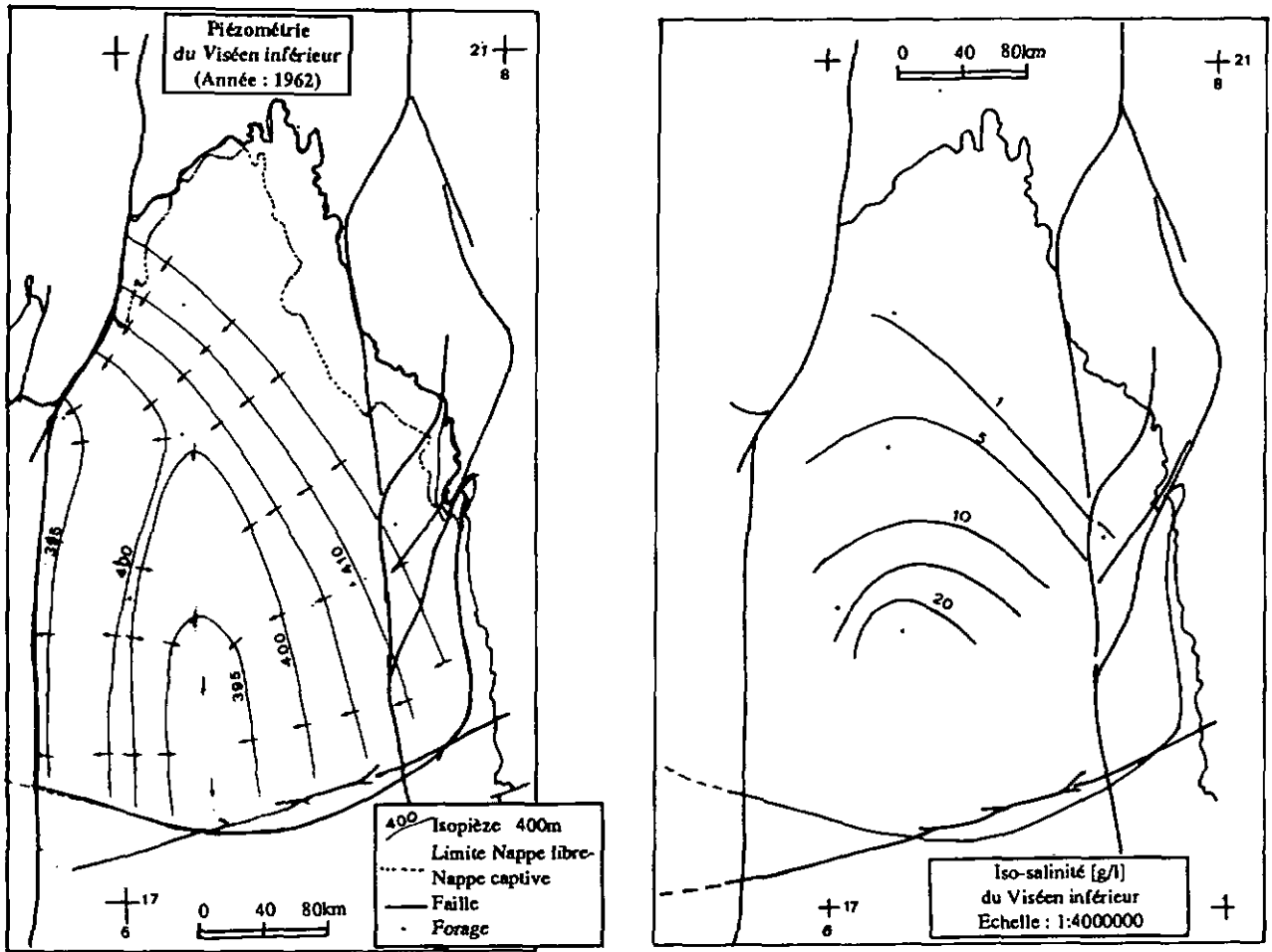
A. 8.1.: Isohypes du mur de l'aquifère du Continental Terminal II CT2 [d'après Bonnier, 1990].



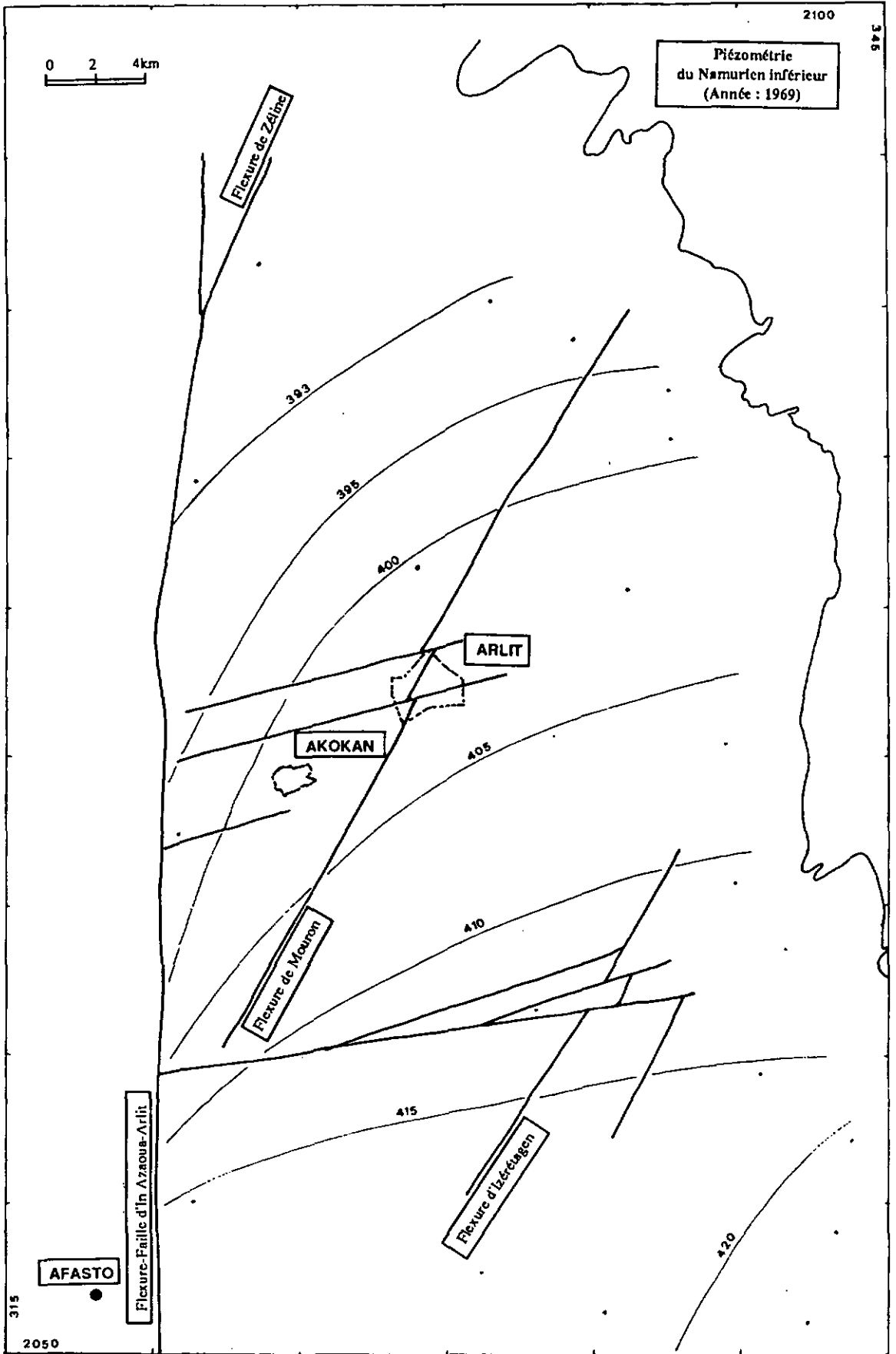
A. 8.2.: Isohypes du toit de l'aquifère du Continental Terminal II CT2 [d'après Bonnier, 1990].



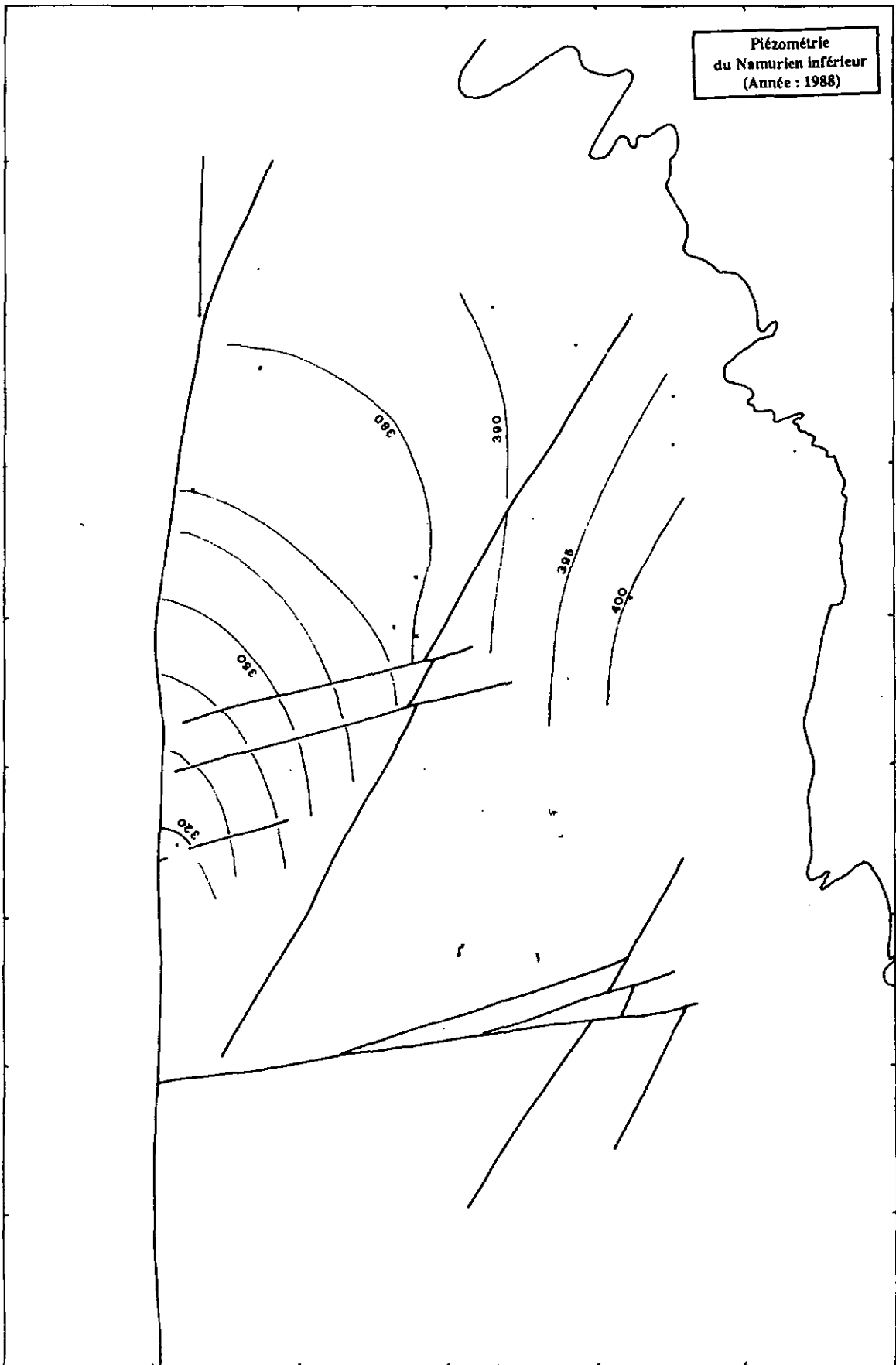
A. 9.: Isohypses du mur de l'aquifère du Continental Terminal III CT3 [d'après Bonnier, 1990].



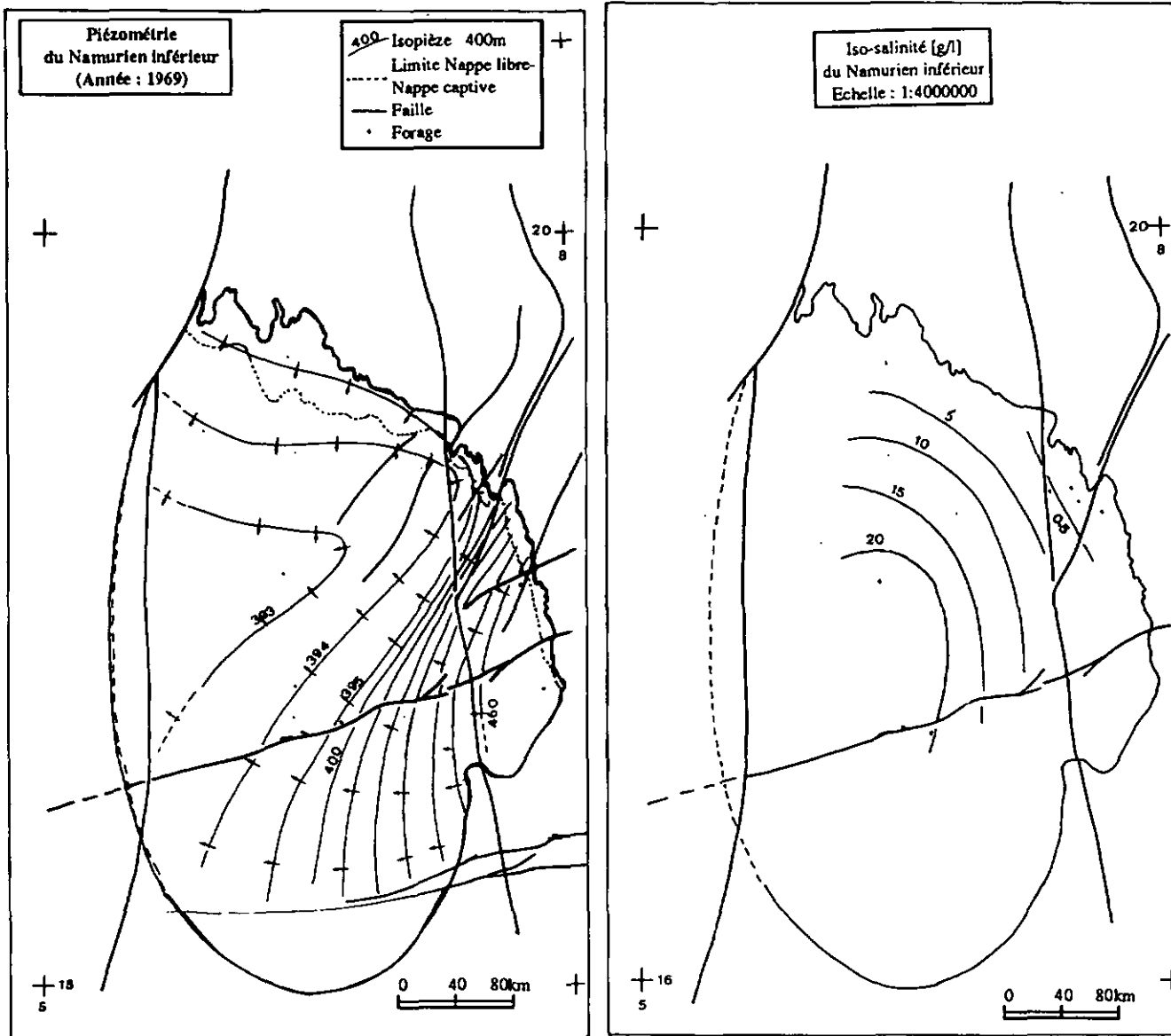
A. 10. : Carte piézométrique et évolution du potentiel hydraulique et de la salinité [g/l] de l'aquifère du Viséen inférieur.



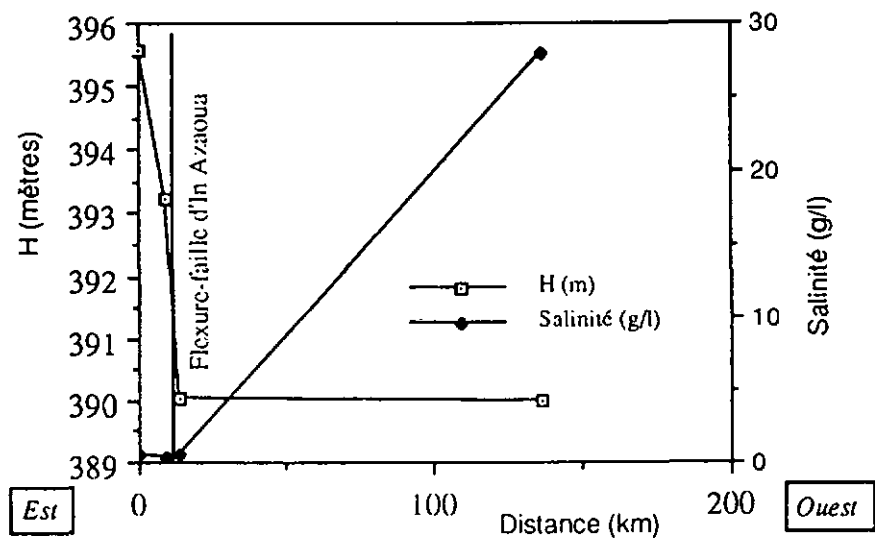
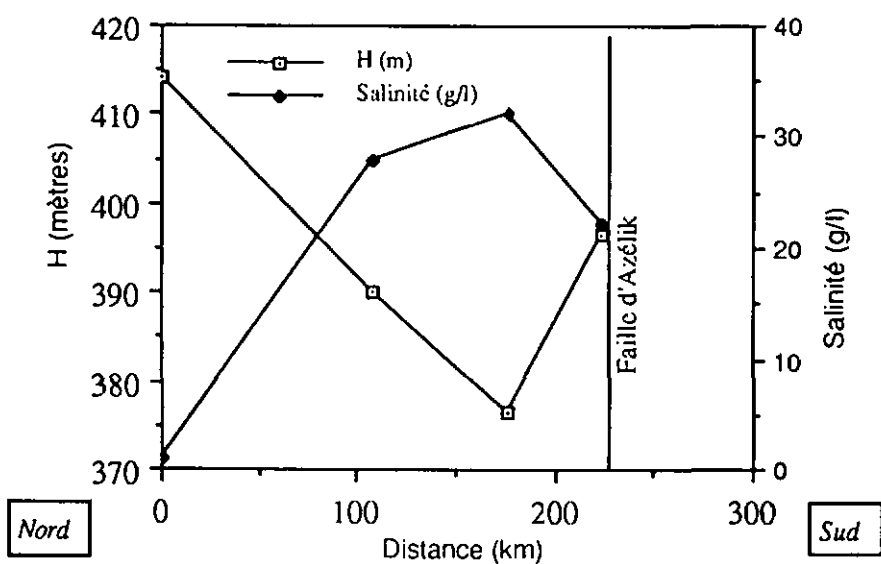
A. 11.1.: Piézométrie de l'aquitard du Namurien inférieur (Guézouman) dans le périmètre minier d'Arlit [Année : 1969].



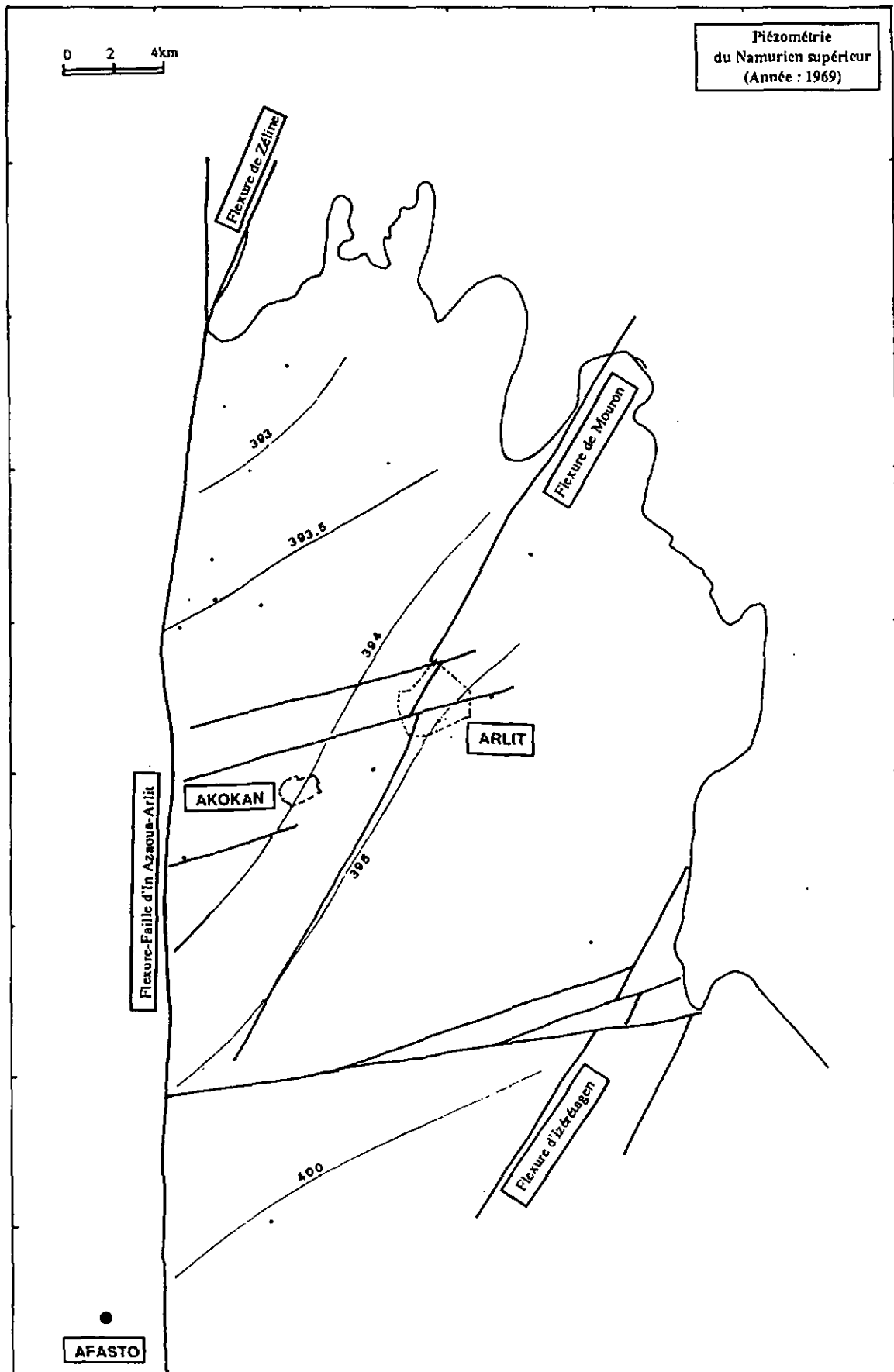
A. 11.2.: Piézométrie de l'aquitard du Namurien inférieur (Guézouman) dans le périmètre minier d'Arlit [Année : 1988].



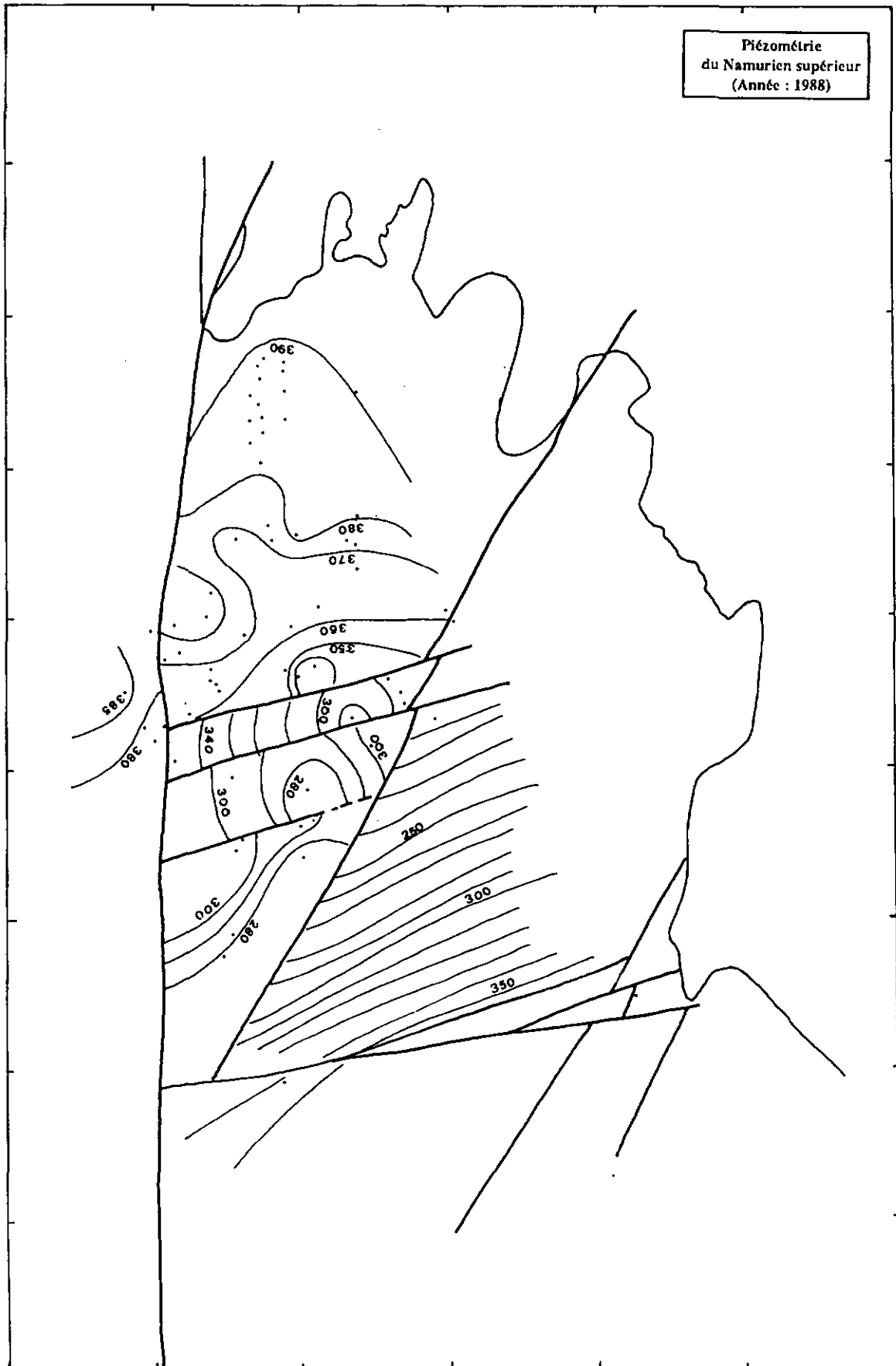
A. 12.1 : Carte piézométrique et carte de la salinité [g/l] de l'aquifère du Namurien supérieur.



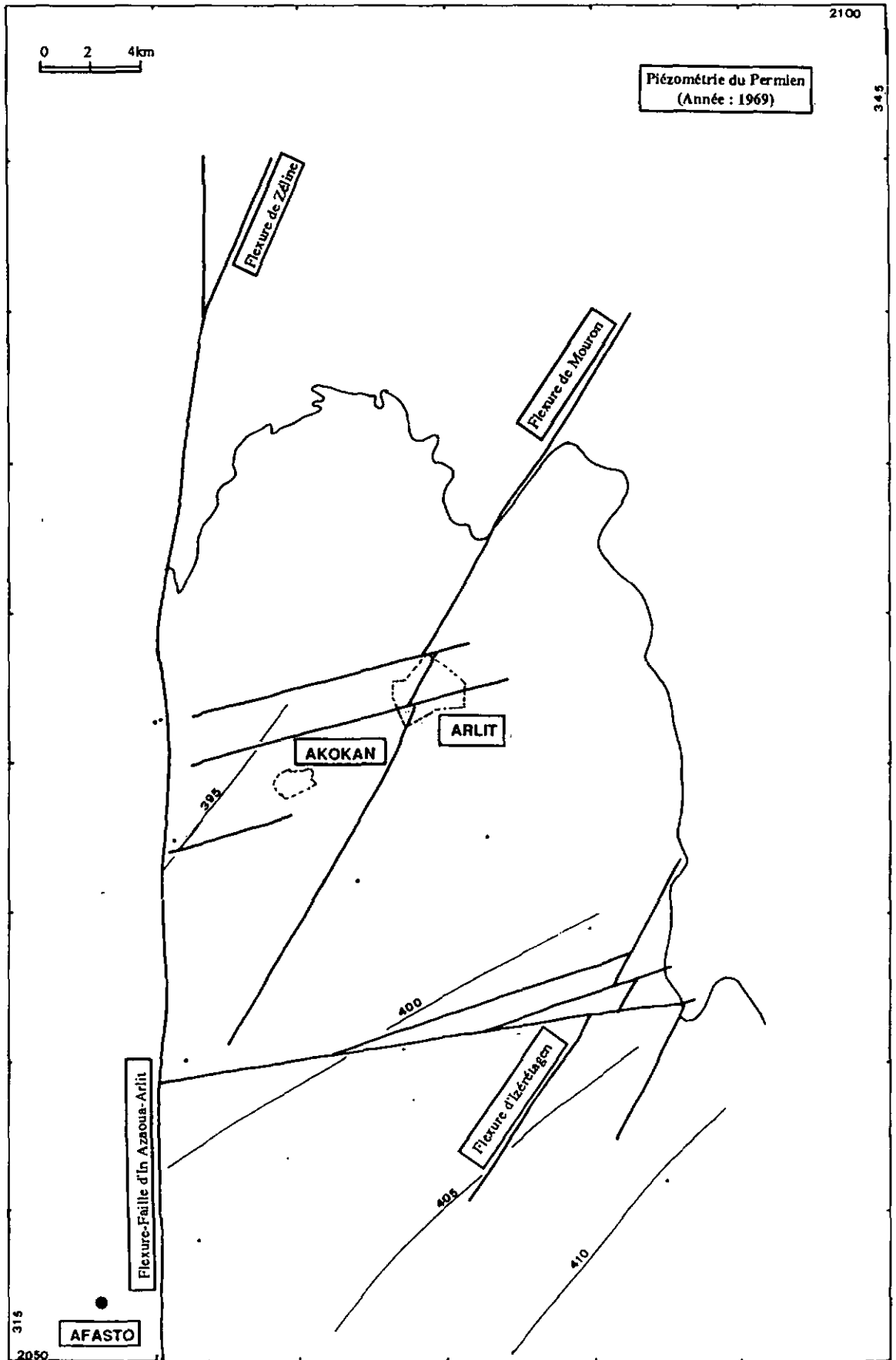
A. 12.2 : Evolution du potentiel hydraulique et de la salinité (en coupe) du Namurien supérieur.



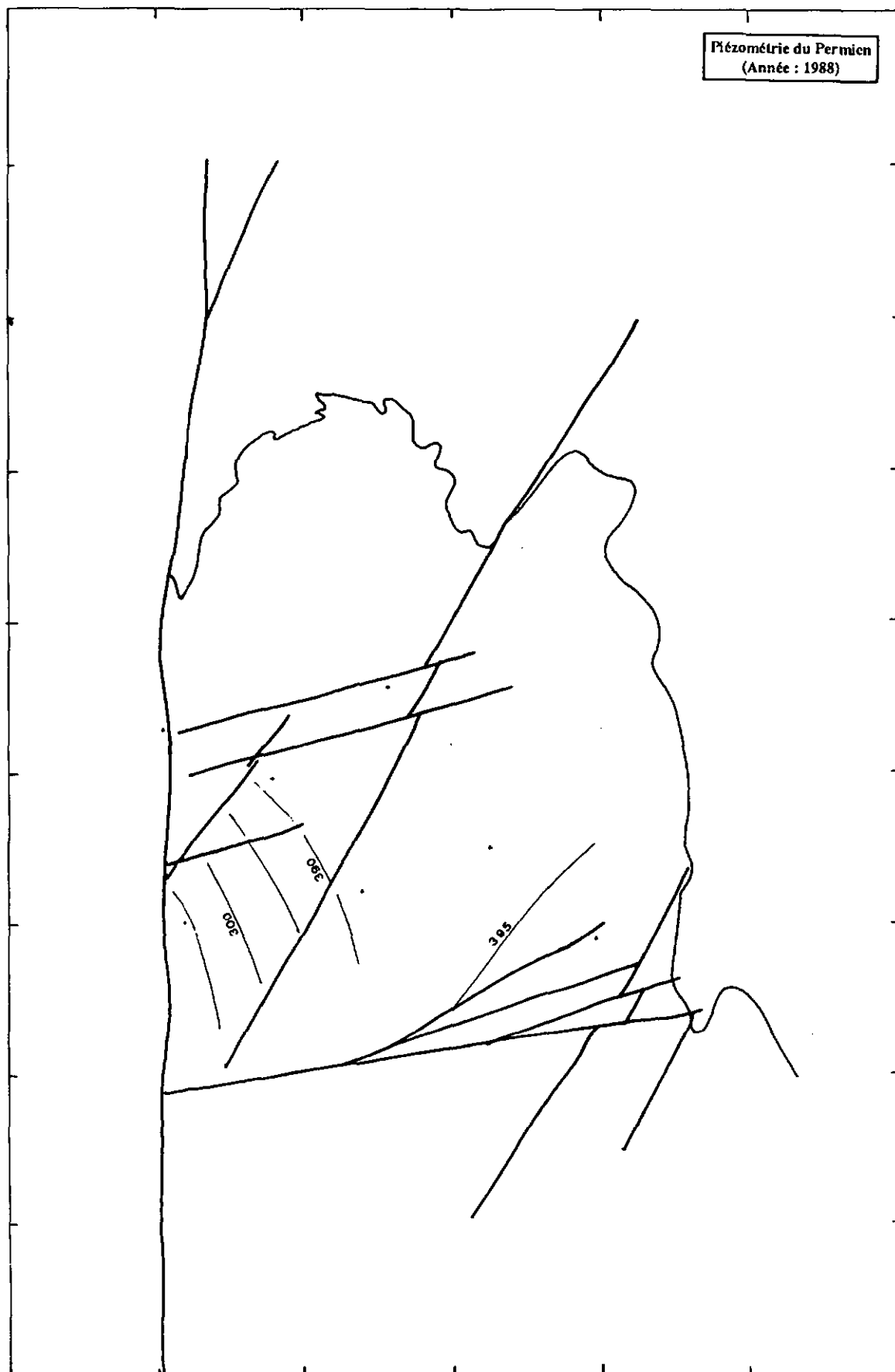
A. 12.3 : Piézométrie du Namurien supérieur dans le périmètre minier d'Arlit . [Année : 1969].



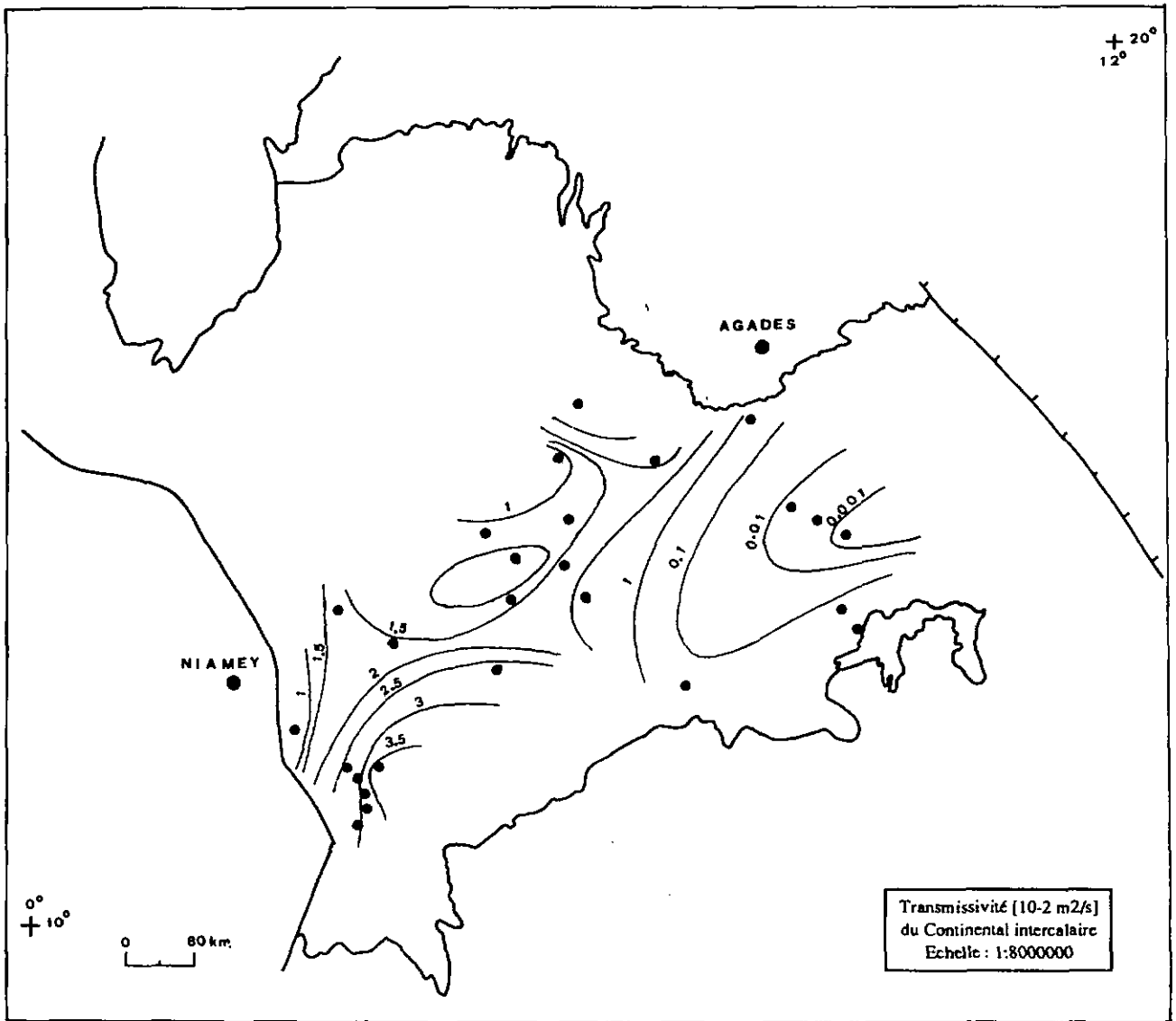
A. 12.4 : Piézométrie du Namurien supérieur dans le périmètre minier d'Arlit . [Année : 1988].



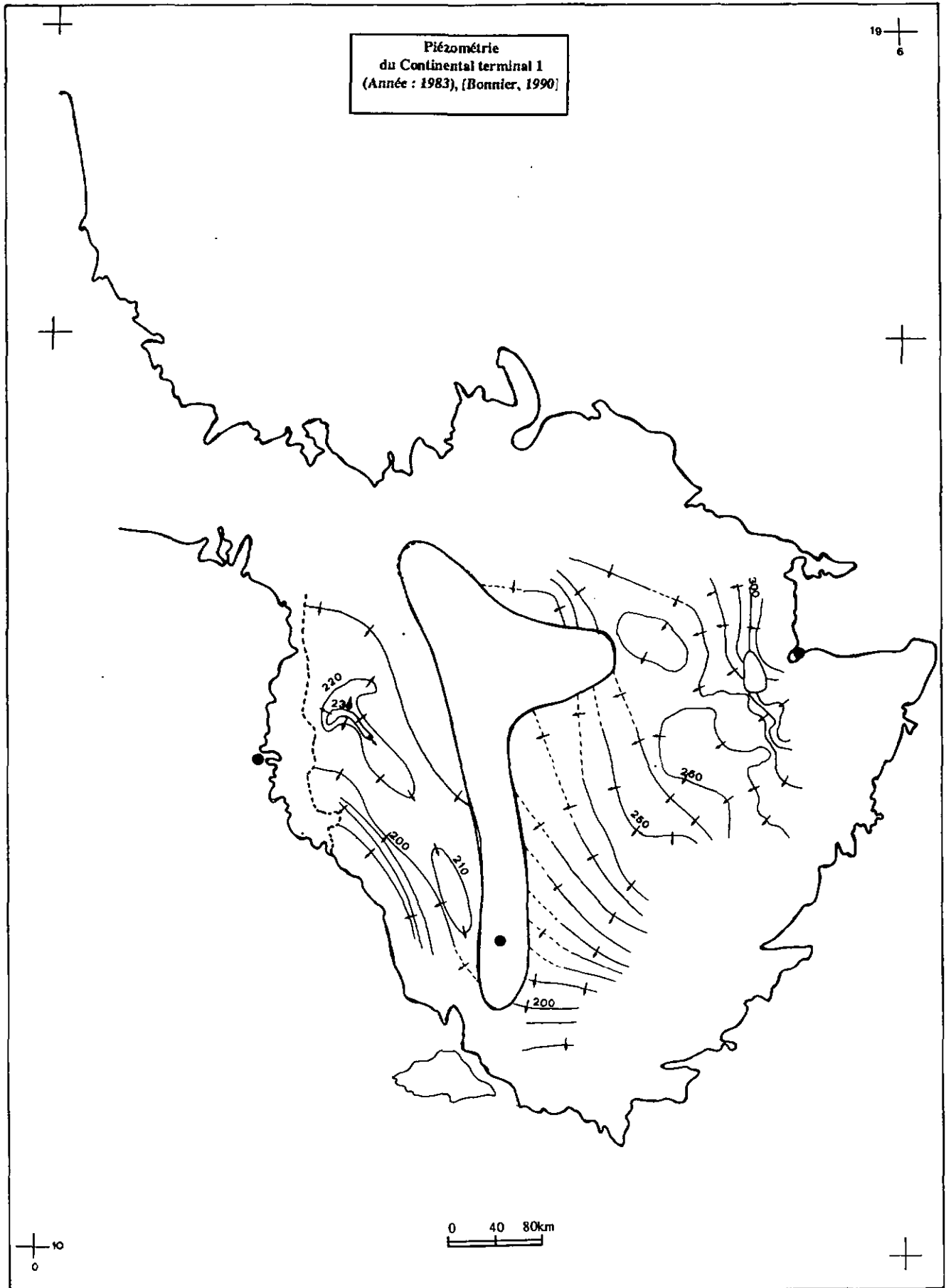
A. 13.1 : Piézométrie de l'aquitard du Permien (Izégouande) dans le périmètre minier d'Arlit [Année : 1969].



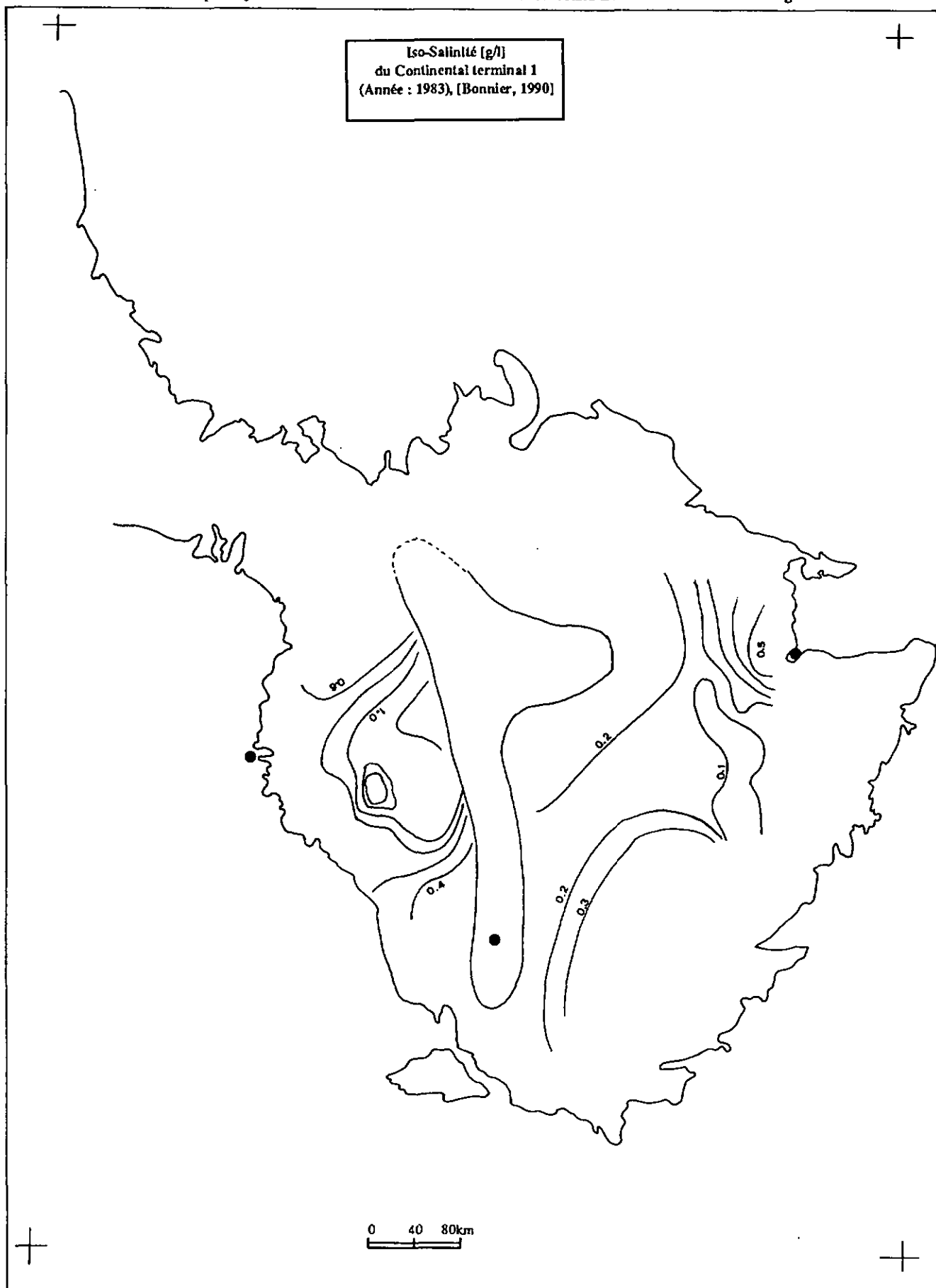
A. 13.2.: Piézométrie de l'aquitard du Permien (Izégouande) dans le périmètre minier d'Arlit [Année : 1988].



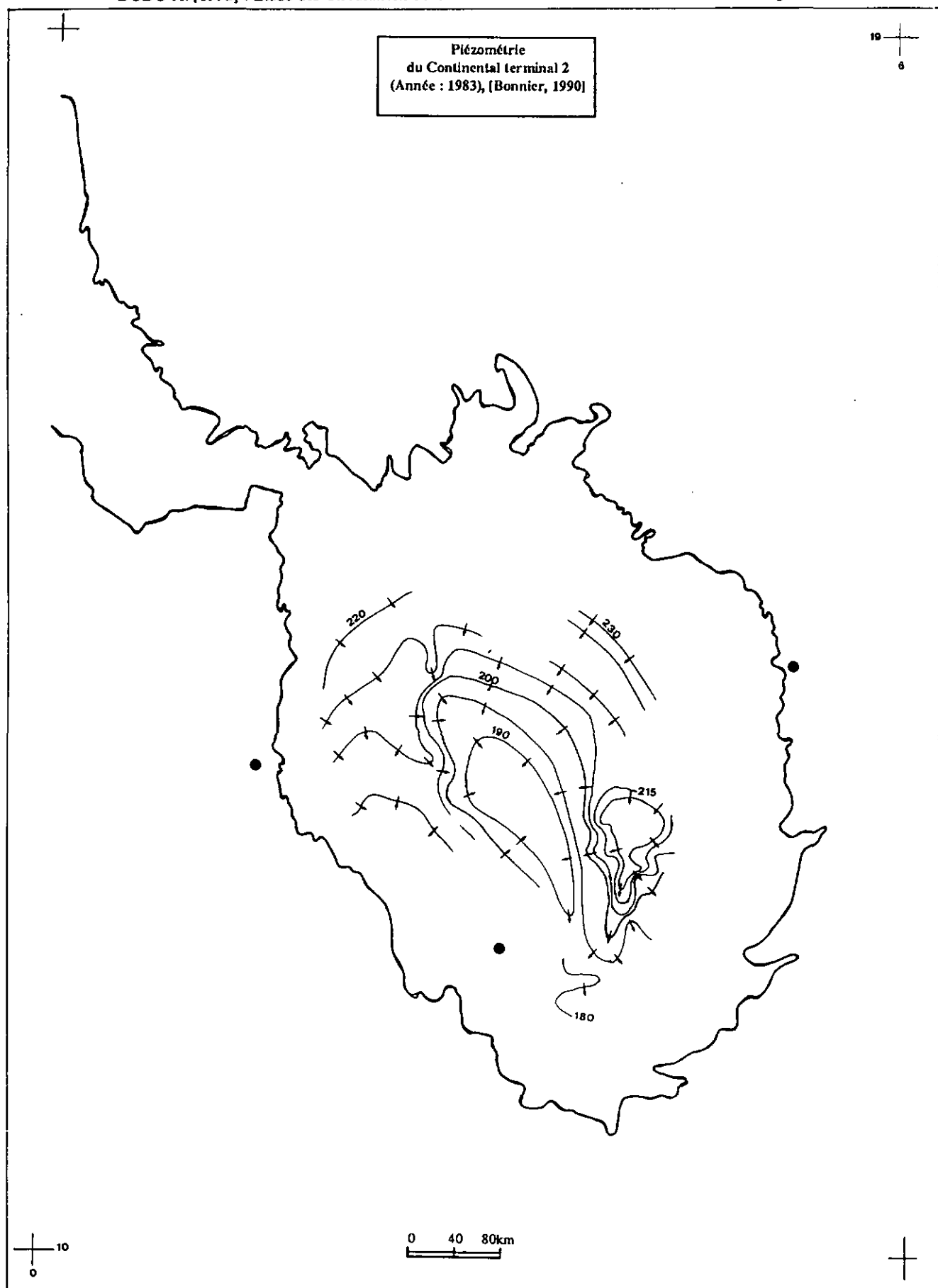
A.14 : Champ des transmissivités  $T$  de l'aquifère du Continental intercalaire CI au sens strict.



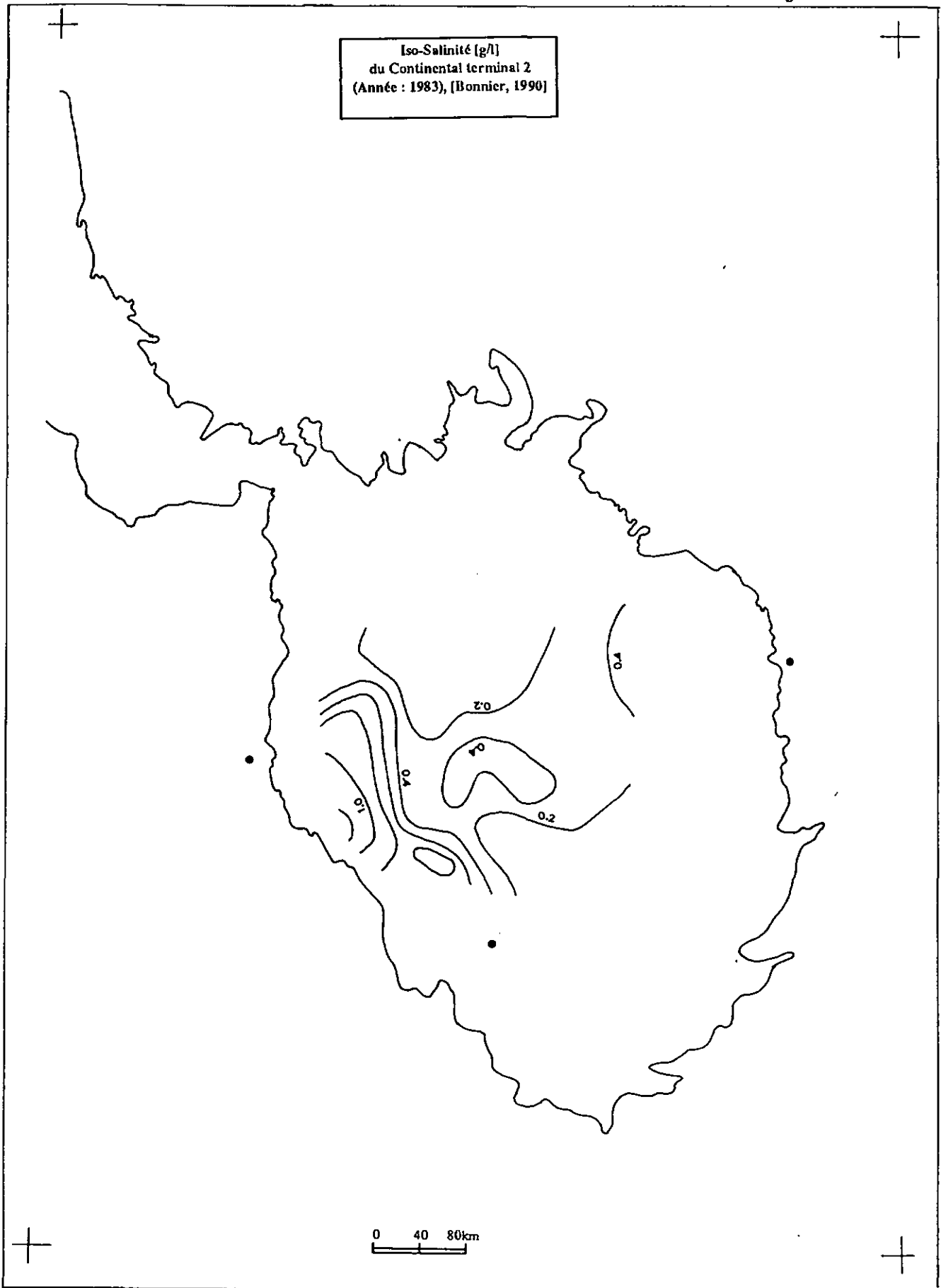
A. 15.1: Carte piézométrique de l'aquifère du Continental Terminal 1 CT1 [d'après Bonnier, 1990].



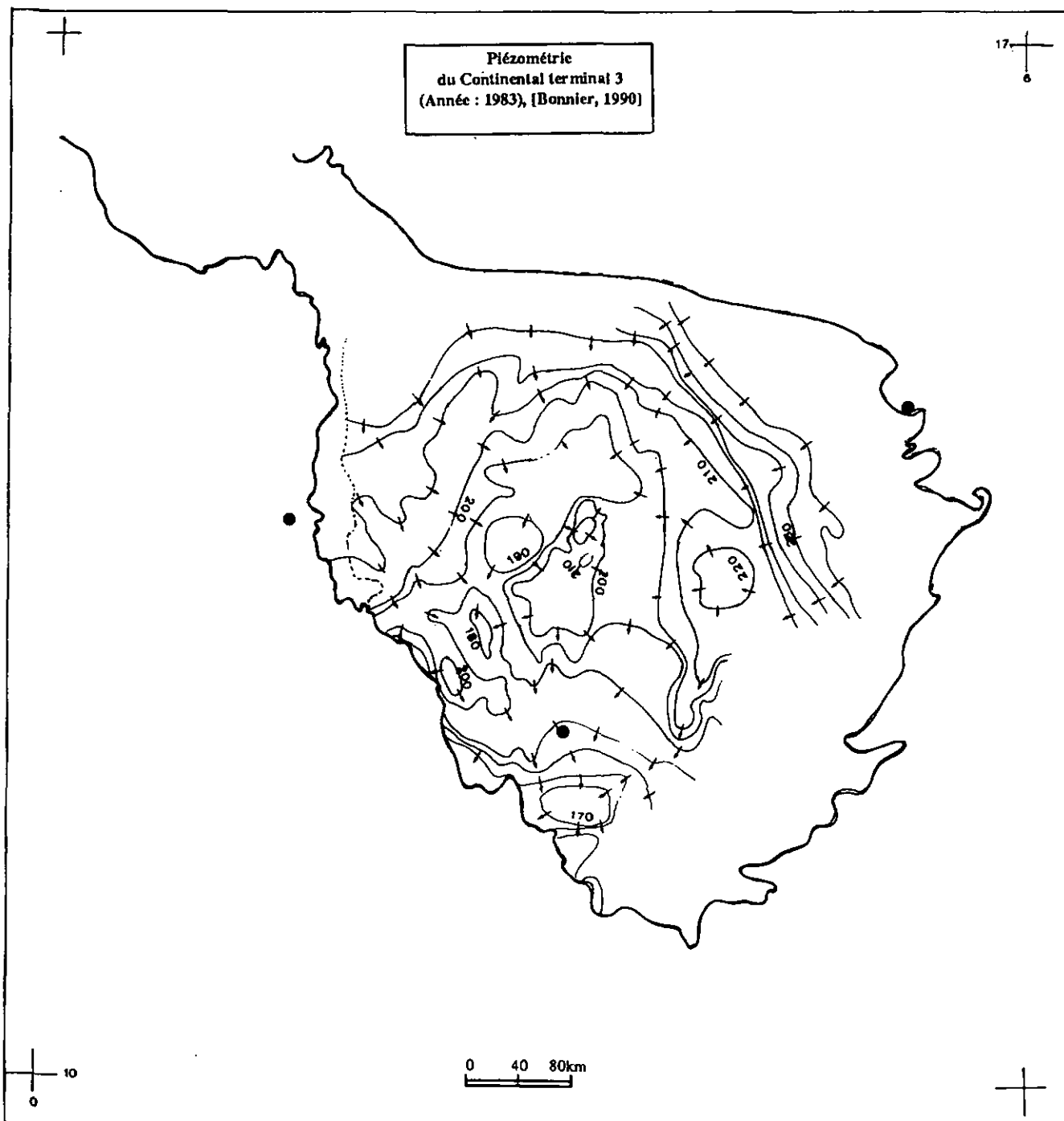
A. 15.2.: Carte d'iso-salinité [g/l] de l'aquifère du Continental Terminal 1 CT1 [d'après Bonnier, 1990].



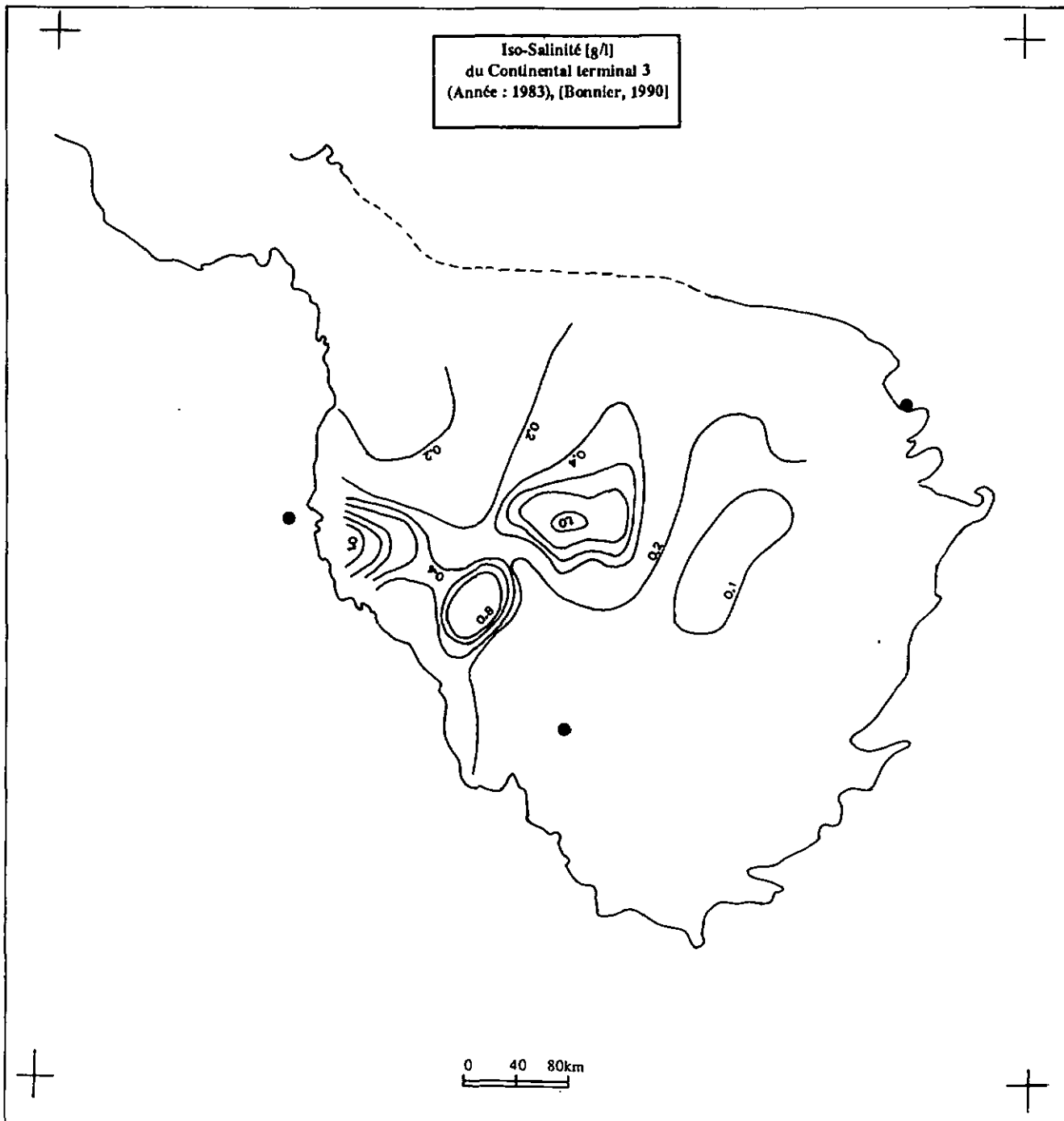
A. 15.3.: Carte piézométrique de l'aquifère du Continental Terminal II CT2 [d'après Bonnier, 1990].



A. 15.4 : Carte d'iso-salinité [g/l] de l'aquifère du Continental Terminal II CT2 [d'après Bonnier, 1990].



A. 15.5 : Carte piézométrique de l'aquifère du Continental Terminal III CT3 [d'après Bonnier, 1990].



A. 15.6.: Carte d'iso-salinité [g/l] de l'aquifère du Continental Terminal III CT3 [d'après Bonnier, 1990].