PRIX HENRI MILON 1961

Hydrogéologie de la plaine du Tafilalt

(MAROC PRÉ-SAHARIEN)

par Jean MARGAT

INGÉNIEUR-GÉOLOGUE,
ANCIEN CHEF ADJOINT DU CENTRE DES ÉTUDES HYDROGÉOLOGIQUES DU MAROC,
DÉTACHÉ AU B.R.G.M.

La présente étude résume le mémoire présenté au concours du prix Henri Milon en 1961, et qui consistait en une monographie hydrogéologique complète d'une grande nappe phréatique du Maroc pré-saharien, tenant lieu en même temps de notice explicative d'une carte hydrogéologique de la région au 1/50 000^e (1).

En raison des objectifs de cet ouvrage et des particularités propres à la région étudiée, il a été nécessaire de donner un large développement à l'étude des caractères géomorphologiques, géologiques, climatiques et hydrologiques. Une part importante du mémoire a aussi été consacrée aux applications et aux problèmes de l'aménagement hydraulique. Aussi, afin de maintenir ce résumé dans des limites raisonnables, a-t-on jugé préférable de s'en tenir ici à l'hydrogéologie proprement dite, qui constitue la part la plus originale du mémoire.

Rares sont en effet les régions de la zone aride où une étude hydrogéologique de nappe phréatique a pu être aussi poussée et poursuivie avec continuité pendant une douzaine d'années. Le mémoire est basé sur les études effectuées au Centre des études hydrogéologiques du Maroc de 1948 à 1960.

Généralités

La plaine de Tafilalt, objet du mémoire, située dans la zone pré-saharienne du sud-est du Maroc, à la latitude moyenne de 31° et à une altitude de 700 à 850 m, couvre environ 700 km². C'est une plaine d'érosion et de remblaiement quaternaire où les oueds Ziz et Rheris, rameaux supérieurs de la saharienne Daoura ont mêlé leurs alluvions, épaisses de 15 à 30 m, sur un substratum paléozoïque pratiquement imperméable. Le gîte géolo-

gique de la nappe phréatique étudiée est donc simple dans ses grandes lignes et bien défini.

Cette région est soumise à un climat sub-désertique que ses composantes font classer dans le type aride : moins de 80 mm/an de pluie en 15 jours par an, en moyenne, température moyenne annuelle supérieure à 21 °C (moyenne de juillet : 34 °C), coefficient d'aridité de Thornthwaite : — 57 (évapotranspiration potentielle : 1 160 mm/an).

Mais cette plaine est dominée par un vaste bassin versant (près de 18 000 km²) étendu dans le haut Atlas mieux arrosé (jusqu'à 600 mm/an sur les sommets). Cependant, malgré la relative régularisation des écoulements favorisée par les massifs calcaires dans le bassin amont où les sources débitent plusieurs mètres cubes/seconde, seules des crues irrégulières et très inégales parviennent au Tafilalt, situé à 100 km au sud du haut Atlas.

Les données hydrologiques concernant le Ziz et le Rheris, les deux principaux oueds arrosant la plaine, sont encore trop fragmentaires, elles se rapportent à une période trop courte (12 années au plus) et procèdent de méthodes trop imprécises pour permettre une analyse rigoureuse. Le régime annuel des cours d'eau comporte deux saisons de crue, automne et printemps, entre lesquelles se répartissent en année moyenne 25 jours d'écoulement du Ziz, et 10 jours du Rheris, mais la variabilité hyperannuelle est très grande. Le Ziz apporte annuellement au Tafilalt 60 à 600 millions de mètres cubes et ses débits de pointe peuvent dépasser 1 000 m³/s, mais son lit peut demeurer sec pendant plus de 6 mois consécutifs.

L'établissement humain a eu enfin des répercussions importantes sur les conditions hydrologiques et hydrogéologiques : depuis plus de 1 000 ans, l'irrigation est organisée dans un vaste périmètre au cœur de la plaine, où se trouve la plus vaste palmeraie d'un seul tenant du Maghreb. Actuellement, l'irrigation se pratique par submersion et épandage d'eaux de crue dérivées; elle est donc soumise aux mêmes fluctuations que les cours d'eau, aussi les surfaces irriguées varient selon les années entre 5 000 et 25 000 ha. On estime à 12 000 m³/an, ha les besoins normaux de l'irrigation en palmeraie dense traditionnelle (à polyculture) : plus de 300 millions de m³/an seraient donc nécessaires pour couvrir les besoins de la palmeraie actuelle, et plus de

(1) La Carte hydrogéologique de la plaine du Tafilalt au 1/50 000^e a été éditée dans la collection des *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc* (n° 150, Rabat, 1960). La publication intégrale du mémoire est en préparation dans la même collection (n° 150 bis, Rabat, 1962).

500 millions pour mettre en valeur l'ensemble de la plaine; malheureusement, les ressources potentielles en eau sont très inférieures à ces besoins et, en outre, elles ne sont que très partiellement régularisées.

Le système d'irrigation actuel a complètement modifié les conditions morphologiques de la plaine, où un réseau de canaux d'épandage divergent s'est substitué à un réseau hydrographique convergent, et il a transformé les conditions hydrologiques : la plus grande partie des eaux de crue est en effet épandue dans le périmètre

où elle s'infiltré et s'évapore, au lieu de s'écouler à l'aval. On estime que, jusqu'au débit de 100 m³/s, les crues du Ziz sont intégralement dérivées et épandues, alors que ce débit n'est dépassé que 3 à 4 jours par an (fréquence : 1 %). Comme on le verra, ceci a une profonde incidence sur le régime de la nappe phréatique.

On se bornera, pour ce qui concerne les données hydrologiques, à reproduire ici les éléments du bilan hydrique superficiel de la plaine du Tafilalet (valeurs moyennes annuelles) :

En 10 ⁶ m ³ /an	Apports	Répartition			Déficit = évapo- transpiration
		infiltration	écoulement à l'aval (return-flow compris)	total	
Précipitations (impluvium 980 km ² — 80 mm/an)	78	1	2	3	75
Crues du Ziz (volume dérivé = 135)	200	40	80	120	80
Crues du Rheris (volume dérivé = 15)	100	5	75	80	20
Crues des autres oueds (5 à 10 % de ruissellement sur 1 300 km ²).	5 à 10	1	5	6	3
Sources	3	0	0	0	3
TOTAL	390	47	162	209	181
Pourcentage	100	12	42	54	46
Tranche d'eau moyenne sur la plaine (630 km ²) en mm/an . .	619	75	257	332	287
en l/s.km ²	19	2,5	8	10,5	8,5

Hydrogéologie

La nappe phréatique de la plaine du Tafilalet est le type d'une nappe de plaine alluviale circulant dans un aquifère extrêmement hétérogène et anisotrope. Ses principales caractéristiques numériques sont les suivantes :

Superficie maximale 630 km²
Longueur 40 km
Largeur 3 à 18 km

Gradient hydraulique :

moyenne = 2 ‰,
minimum = 0,4 ‰,
maximum = 5 ‰.

Profondeur de la surface piézométrique :

en période d'étiage moyen :

— 1 à — 17,5 m (moyenne : — 6,5 m) ;
en période de recharge maximale :
— 0,5 à — 14,5 m (moyenne : — 4,5 m).

Surface de la section mouillée transversale (front de nappe) :

20 000 à 100 000 m²

Puissance aquifère :

0 à 21 m, moyenne 6,3 m.
Volume aquifère moyen : 4.10⁹ m³.
Volume d'eau moyen probable de la
nappe : 100 à 250.10⁹ m³. } en période
d'étiage
moyen

Débit d'écoulement moyen :

100 à 300 l/s selon les sections.

Vitesse moyenne probable : 2 à 6 m/jour.

Transmissivité moyenne probable : 1 à 2.10⁻² m²/s.

Coefficient de perméabilité moyen probable :

K = 1.10⁻⁸ m/s.

Concentration de l'eau (résidu sec) :

0,8 à 70 g/l (faciès chloruré sodique) (fréquence maximale : 2 à 3 g/l; sur 75 % de la nappe la concentration est > 3 g/l).

Températures de l'eau :

minimums extrêmes (mars) 9 à 11 °C
maximums extrêmes (juillet ou août). 22 à 25 °C

minimum moyen 13 °C
 maximum moyen 20 à 21 °C

moyenne annuelle :

14 à 17° selon la profondeur de l'eau.

Régime :

- amplitudes annuelles extrêmes :
 minimum 0,2 m, maximum 7,1 m;
- amplitudes moyennes annuelles :
 minimum 0,3 m, maximum 4,1 m, moyenne 1,8 m;
- vitesses de recharge les plus fréquentes :
 0,2 à 1 m/mois;
- vitesse de décharge la plus fréquente :
 0,15 m/mois;
- amplitudes hyperannuelles extrêmes :
 minimum 1 m.

Variations annuelles du volume d'eau probables :

1 à 27.10⁶ m³ (1954-1959).

Ne pouvant résumer ici l'analyse des nombreuses données concernant l'hydrodynamique, les caractères chimiques, le régime et le bilan hydrique de la nappe, on se bornera à exposer l'essentiel des conclusions.

I. — Origine des eaux souterraines.

La nappe phréatique est alimentée pour l'essentiel par les infiltrations d'eaux superficielles temporaires, en l'occurrence les crues du Ziz et du Rheris. L'apport des précipitations est quasi nul et les apports latéraux soutenus ne dépassent pas un cinquième du total. Mais l'infiltration des eaux de surface résulte elle-même pour la plus grande part de leur épandage pour l'irrigation favorisée par la valeur élevée du coefficient d'infiltration globale des eaux épandues (ordre de 40 %); le facteur humain est donc prépondérant dans l'alimentation de la nappe. Si l'on supprimait les apports dus à l'irrigation, l'alimentation de la nappe serait réduite des deux tiers. Cette nappe doit donc être considérée dans une grande mesure comme un sous-produit des irrigations; en d'autres termes, elle se trouve en permanence dans un état de suralimentation artificielle.

On remarquera enfin que la nappe du Tafilalet entre dans la première catégorie de la classification de Guirski des eaux souterraines dans les pays arides : eaux infiltrées sur place, en milieu désertique, mais originaires d'une zone plus humide. En dernière analyse, l'existence d'une nappe phréatique relativement riche (module d'alimentation : 1 à 10 l/s.km², en moyenne 3,5 l/s.km²) au regard des conditions hydro-climatiques locales, n'est permise que par l'extension des bassins versants du Ziz et du Rheris dans le haut Atlas, et la convergence de ces cours d'eau dans la plaine du Tafilalet.

II. — Grandeur et forme de la nappe phréatique.

La nappe est très étendue, mais peu profonde et peu puissante. C'est une nappe de « subsurface »; sa forme

épouse d'ailleurs la forme légèrement convexe de la plaine et sa pente est très faible. En conséquence, cette nappe est très sensible aux conditions hydrologiques et atmosphériques superficielles — et, ce, d'autant plus du fait de son mode d'alimentation —, et sa réserve d'eau par unité de surface est faible (100 à 300.10³ m³/km²), ce qui limite sérieusement l'exploitabilité là où la perméabilité n'est pas très grande.

III. — Hydrodynamique et régime.

Le milieu aquifère se caractérise par une grande hétérogénéité, verticale surtout, mais aussi horizontale, donc par une gamme de perméabilités et de transmissivités très étendue ($K = 10^{-1}$ à 10^{-8} m/s) et par des variations très locales de ces grandeurs, ce qui diminue beaucoup les rayons d'extrapolabilité des mesures et des tests hydrodynamiques exécutés, et rend peu significative l'évaluation de moyennes.

Le débit de la nappe varie irrégulièrement de l'amont à l'aval, tantôt croissant, tantôt décroissant; maximal au centre de la plaine (jusqu'à près de 300 l/s), il est finalement plus faible à l'extrême-aval qu'à l'amont.

Le contrôle du régime de la nappe pendant 7 ans a fait apparaître une fluctuation incessante, générale, et irrégulière du niveau piézométrique : artificiellement exhaussé par la suralimentation, il évolue toujours au-dessus du niveau d'équilibre théorique qui serait fonction des seuls apports naturels. Autrement dit, cette nappe est toujours en état de déséquilibre, et plus souvent en décharge (baisse) qu'en recharge (montée). Les variations de niveau sont irrégulières, en vitesse comme en durée : elles sont essentiellement déterminées par les crues et les périodes d'irrigation (durée, intensité, étendue). Leurs amplitudes sont grandes et constituent une fraction en général importante de la puissance aquifère moyenne. A l'extrême-aval seulement, dans la zone d'évaporation de la nappe, les fluctuations paraissent périodiques (annuelles) et sinusoïdales de part et d'autre d'un niveau médian constant : ces oscillations paraissent directement liées à la variation annuelle de l'intensité de l'évapotranspiration potentielle.

Le « taux de renouvellement » de la nappe est donc grand, tant globalement, en considérant le rapport entre le volume annuel des apports et le volume d'eau moyen (1 à 4), que d'amont en aval, si l'on considère le rapport entre le débit continu moyen fictif des apports et le débit de la nappe selon diverses sections (10 à 20 fois). Ainsi, la nappe s'apparente-t-elle plus à un lac souterrain, à un réservoir, qu'à un sous-écoulement. Compte tenu de sa faible vitesse d'écoulement, la durée théorique de l'écoulement de l'eau d'amont en aval serait d'environ une trentaine d'années, pendant lesquelles les apports seraient de l'ordre de 2 milliards de mètres cubes et, par conséquent, le volume d'eau de la nappe se serait renouvelé 10 à 20 fois.

Sur le plan pratique, on notera que l'extrapolation des courbes exponentielles de décharge non influencée de la nappe rend possible une prévision à moyen terme de l'évolution future du niveau piézométrique, dans le cas d'une période sèche prolongée. Enfin, une recharge artificielle de la nappe, c'est-à-dire une suralimentation encore plus accentuée est possible, mais assez limitée en volume, et à la condition impérative que le rééquilibrage du bilan hydrique ne se fasse pas par un accroissement de l'évapotranspiration, ce qui accroîtrait la salinité.

IV. — Bilan hydrique.

Le bilan moyen équilibré indiqué ci-dessous, qui ne tient pas compte des variations de niveau et de volume

de la nappe, est l'expression annuelle d'un bilan pluri-annuel additionnant une série de bilans annuels réels déséquilibrés, mais se compensant à peu près dans l'ensemble :

ACTIF (alimentation)			PASSIF (exutoires et prélèvements)		
	10 ⁶ m ³ /an	%		10 ⁶ m ³ /an	%
Précipitations (=1,4 mm/an sur 630 km ²)	1	1,4	Emergences (95 l/s)	3	4,3
Ecoulement de l'amont et affluences (400 à 500 l/s)	14	20	Exutoires occultes (60 l/s) . . .	2	2,9
Infiltration dans les oueds . . .	10	14	Exploitations (400 l/s)	14	20
Infiltration des eaux épandues pour irriguer	45	64	TOTAL	19	27,2
TOTAL	70	100	Evapotranspiration (70 — 19) = 81 mm/an sur 630 km ² . .	51	72,8
	10 ³ m ³ /an par km ²	l/s.km ²	TOTAL	70	100
Module d'alimentation moyen.	111	3,5	Module moyen de l'évapotranspiration	81	2,8

Ce bilan rend évident la grande prépondérance des échanges d'eau verticaux entre la nappe et la surface : plus de 80 % des apports d'eau et plus de 90 % de la décharge s'effectuent par la surface. Les expressions en hauteurs de tranche d'eau et en module sont beaucoup plus significatives si l'on considère des bilans fractionnés : la plus grande partie de ces échanges (75 %) s'effectue en effet dans les périmètres irrigués où le module d'alimentation peut atteindre 10 l/s.km², soit 175 fois plus que la part infiltrée des précipitations.

V. — Evapotranspiration.

Elle apparaît comme le principal facteur — de beaucoup — de la décharge de la nappe. A la fois directe, par exsudation de la nappe là où elle est peu profonde, et indirecte, par évaporation des eaux d'épandage et d'imbibition des sols irrigués et transpiration de la végétation — palmiers surtout —, son intensité et sa hauteur demeurent bien inférieures à celles de l'évapotranspiration potentielle calculée (Thornthwaite : 1 160 mm/an) : 80 mm/an en moyenne, et 250 mm/an dans les palmeraies. Toutefois, si l'on y ajoute l'évaporation des eaux superficielles et météoriques, en dressant un bilan hydrique total (eaux superficielles et souterraines) de la plaine, on trouve que l'évapotranspiration totale réelle, encore assez inférieure à l'évapotranspiration potentielle hors des palmeraies (330 mm/an), s'en rapproche notablement dans celles-ci (900 mm/an). L'évaluation par calcul de l'évapotranspiration réelle totale (Thornthwaite) aboutit à des valeurs comparables, compte tenu des tranches d'eau épandues en domaine irrigué : 720 mm/an en surface en palmeraie (+ 80 mm d'exsudation de la nappe = 800 mm).

VI. — Salinité des eaux souterraines.

L'eau de la nappe phréatique est salée (chlorurée sodique) sur sa plus grande étendue, et est impropre à tout usage en de vastes secteurs (plus de 10 g/l sur le cinquième de la plaine). Mais la gamme des concentrations est très étendue (0,8 à 70 g/l) et des eaux relativement douces existent en plusieurs zones assez localisées.

La concentration généralement élevée des eaux souterraines et son taux d'accroissement rapide et en accélération géométrique d'amont en aval, sont une conséquence directe du grave déficit du bilan hydrique, de la lenteur de l'écoulement de la nappe, et enfin de l'intensité de l'évapotranspiration et de son importance relative dans la décharge de la nappe.

Les principaux apports de sel proviennent des eaux d'irrigation (malgré leur faible concentration) et résultent d'un « cycle du sel » entre l'eau de la nappe, l'eau d'infiltration et le sol. La concentration de l'eau varie dans le temps, en un point donné, en fonction des fluctuations de la nappe et, le plus souvent, en raison inverse de la profondeur ; mais sous les périmètres irrigués, un certain équilibre dynamique paraît s'établir et se traduit par une salinité moyenne annuelle, ou du moins hyperannuelle, de l'eau et du sol. Par contre, en aval de ces périmètres, la concentration s'accroît continuellement dans le temps, et rapidement dans l'espace, tant dans l'eau que dans le sol. L'apport global de sels à la nappe phréatique, évalué à environ 30 000 tonnes par an en moyenne, s'accumule ainsi à l'aval de la plaine.

Il apparaît donc clairement que le maintien approché de la salinité du sol et des eaux souterraines dans les périmètres irrigués est étroitement fonction des conditions hydrologiques et du mode d'irrigation actuels : cet équilibre est instable et peut être rompu dans un sens ou dans l'autre. La salinité pourrait, en effet, croître

si les apports d'eau à la nappe s'effectuaient de telle sorte que le lessivage du sol soit atténué (par exemple, par abaissement des modules d'irrigation, même en cas d'augmentation globale des apports), ou si l'évapotranspiration augmentait: soit en valeur relative, par accroissement trop fort de l'irrigation exclusive par eau souterraine pompée, soit en valeur absolue dans le cas où le bilan hydrique de la nappe suralimentée ne pourrait se rééquilibrer autrement. Inversement, la salinité pourrait décroître si la part de l'évapotranspiration dans la décharge diminuait, notamment par le drainage.

VII. — Ressources en eaux souterraines.

Trois points principaux ressortent :

D'abord les transmissivités localement très élevées, et le taux de renouvellement important de la réserve créent la possibilité d'une très forte surexploitation temporaire de la nappe. C'est-à-dire que l'on peut faire varier très largement selon les saisons — et dans une moindre

mesure selon les années — les volumes d'eau prélevés, afin de s'adapter à une demande elle-même très variable. L'exploitation des eaux souterraines à grande échelle peut fournir une ressource de complément parant à l'extrême et imprévisible irrégularité des ressources en eau superficielle.

Par contre, les ressources potentielles de cette nappe considérées globalement, sont assez limitées si on n'augmente pas les apports, ou si on ne diminue pas l'évapotranspiration (l'un n'irait d'ailleurs pas sans l'autre) : la possibilité d'élever le volume de la balance hydrique de la nappe sans la déséquilibrer au profit de l'évaporation, sera la condition de base de tout accroissement durable des ressources potentielles en eau souterraine.

Enfin, le volume moyen de la nappe est faible — globalement et localement — aussi n'existe-t-il pas de possibilité de surexploitation à très long terme sans risque grave. La possibilité d'une plus grande régularisation d'eau superficielle par la nappe est partielle et limitée : elle pourrait s'harmoniser avec une régularisation classique, par barrage, mais non s'y substituer.

Dès à présent, on peut souligner que l'exploitation de la nappe, encore pratiquée principalement par des modes traditionnels, fournit les 4/5^{es} des ressources en eau pérenne, et près de 10 % du total des ressources en eau.

LISTE DES DOCUMENTS REÇUS PAR LA SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE DEPUIS LA DERNIÈRE SESSION DU COMITÉ TECHNIQUE

HYDROLOGIE

- GA O — Anonyme. — Bibliographie des auteurs et travaux français de l'A.G.I.
Comité National français pour l'Année Géophysique Internationale. — Comité Central des Expéditions Scientifiques.
Paris, 20 juin 1961.
- GA 11 — H. ARNOLD, H. BODE, H. WORTMANN, H. KARENBERG et R. TEICHMULLER. — Commentaires sur la feuille « Munster C 4310 ».
A — carte géologique,
B — carte pédologique,
C — carte hydrogéologique.
Herausgeber und Vertrieb : *Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen*, Krefeld, Westwall 124, Krefeld, 1960.
- GA 11 — J. BOUKAERT und Mitarbeiter. — Le carbone de la pendance littorale (subvariscischen). Tome 1 : Le sommet et la face sans lit de Namur.
Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen. Herausgegeben vom *Geologischen Landesamt Nordrhein-Westfalen*, Band 3, Krefeld, 1960.
- GA 11 — P. REMENYI, Gy. SCHEUER et P. SZOFOGADO. — Le rôle de la structure des montagnes dans l'hydroscopie.
Institut de Géodésie et Géotechnique du Ministère du Bâtiment, FTI, Budapest, 1950-1960.
- GA 122 — Anonyme. — Précipitations extrêmes en Autriche dans la période 1901-1950.
Hydrographischer Dienst in Oesterreich. Beiträge zur Hydrographie Oesterreiche, n° 31, Wien, 1960.
- GA 14 — Aloïs BRATANEK. — Le régime de la température des eaux de rivières et ses variations avec les aménagements.
Vyzkumny Ustav Vodohospodarsky Prace a Studie, Sesit 101, Praha-Podbaba, 1961.

- GA 14 — A. GIAO et J. ROULLEAU. — Le champ de température dans quelques types de mouvements atmosphériques.
Mémorial de la Météorologie Nationale, Paris, 1960.
- GA 14 — Anonyme. — Atlas Hydrologique de Hongrie. Série II : Données hydrométéorologiques. Fascicule 2 : Température et évaporation.
Institut de Recherche des Ressources Hydrauliques, Budapest, 1953.
- GA 22. — Anonyme. — Atlas Hydrologique de la Hongrie. Série III : Données relatives au régime des eaux. Fascicule 1 : Les hauteurs d'eau caractéristiques.
Institut de Recherche des Ressources Hydrauliques, Budapest, 1953.
- GA 23 — Dr-ing. Konrad SIMMER. — Contribution à la détermination des débits moyens des cours d'eau.
Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch, n° 23. Herausgegeben von der *Bundesanstalt für Gewässerkunde*, in Koblenz, 1961.
- GA 24 — Anonyme. — Atlas hydrologique de la Hongrie. Première partie : Les bassins versants.
Deuxième partie : La rivière Sajo.
Institut de Recherche des Ressources Hydrauliques, Budapest, 1953.
- GA 25 — R. LUGANE. — Les inondations des 3 et 4 octobre 1960 à Aubusson.
Extrait des *Mémoires de la Société des Sciences Naturelles et Archéologiques de la Creuse*, tome XXXIV, fascicule 1, Guéret, 1960.
- GA 55 — J. MARGAT. — Le Centre des Etudes Hydrogéologiques de Rabat.
Notes et mémoires du *Service Géologique* n° 153 : Les recherches hydrogéologiques au Maroc, édition de la *Division de la Géologie, Ministère des Travaux Publics*, Rabat, 1961.