



Reproduction provisoire  
Sans bibliographie  
ni schémas

UNESCO/AVS/NR/IHD/131  
Colloque de Dubrovnik  
Communication n° 46

PARIS, le 24 septembre 1965  
Original : français

ORGANISATION DES NATIONS UNIES  
POUR L'EDUCATION, LA SCIENCE ET LA CULTURE

DECENNIE HYDROLOGIQUE INTERNATIONALE

Colloque sur l'hydrologie des roches fissurées

organisé par le Gouvernement yougoslave et l'Unesco  
en collaboration avec la FAO, l'AIH et l'AIHS

Dubrovnik (Yougoslavie)  
7-14 octobre 1965

EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES ET  
BILAN HYDRIQUE DANS LES CALCAIRES DE TUNISIE

par

Gilbert CASTANY

L'exploitation rationnelle, depuis plusieurs années, des eaux souterraines de quelques massifs calcaires de Tunisie, reposant sur l'étude géologique et hydrologique régionale détaillée, a permis d'établir des bilans hydriques et d'évaluer les ressources en eau.

Les travaux réalisés sont un exemple de régularisation des ressources en eau par l'utilisation des structures hydrogéologiques comme réservoirs souterrains naturels.

Nous exposerons ici les résultats des études de J. TIXERONT et E. BERKALOFF concernant les massifs calcaires des djebels Chennata, Zaghouan et bent Saïdane et de H. ZEBIDI relative au Bargou. Les trois derniers appartiennent à la même zone climatique et structurale de l'Atlas tunisien oriental au S.E. de Tunis.

DJEBELS CHENNATA, ZAGHOUAN et BENT SAIDANE

J. TIXERONT et E. BERKALOFF ont étudié le bilan hydrique des massifs calcaires du Chennata, Zaghouan et bent Saïdane dont les eaux souterraines alimentent les villes de Bizerte et de Tunis.

Cadre hydrogéologique

La structure hydrogéologique et les données sur la roche magasin de ces massifs calcaires sont bien connues par des études géologiques détaillées. Le bassin des eaux souterraines (bassin hydrogéologique), correspondant au bassin

versant des eaux de surface (bassin hydrographique), est nettement délimité par la stratigraphie et la tectonique. L'alimentation naturelle du réseau aquifère s'effectue uniquement par les précipitations sur l'impluvium direct (pluie et neige). Le djebel Chennata, formé de calcaires du Sénonien, présente un impluvium de 1,8 km<sup>2</sup>. Un forage situé à l'amont des captages permet de suivre les variations du plan d'eau. Au djebel Zaghoan ce sont les calcaires jurassiques qui servent de réservoir alimentant trois sources et des galeries de captage. La galerie la plus basse est située à une trentaine de mètres au-dessous de la surface maximale des eaux souterraines. Leur impluvium atteint 20 km<sup>2</sup>. Les calcaires du Lias du bent Saïdane, d'une superficie de 17 km<sup>2</sup>, alimentent des sources et forages.

Exploitation des eaux souterraines

Les systèmes de captages, galeries et sondages, de ces massifs calcaires permettent de régler la production en eau selon les besoins. Ainsi en été (juillet-août), le niveau de la surface des eaux souterraines est abaissé par exploitation intensive et en période de précipitation importante (décembre-janvier) les réserves se reconstituent par alimentation naturelle. On utilise ainsi la structure hydrogéologique comme réservoir souterrain naturel pour la régularisation des ressources en eaux.

Au Chennata, une galerie avec serrement permet de vidanger une tranche de roche magasin de 30 mètres de puissance et de 3 km<sup>2</sup> de superficie. Au bent Saïdane il existe deux captages de sources et un puits foré capable d'exploiter par pompage une réserve d'eau de 15 millions de mètres cubes, correspondant à une tranche de calcaire de 20 mètres environ d'épaisseur. Trois sources captées et deux galeries utilisent le réseau aquifère du Zaghouan.

Bilan hydrique annuel moyen

Les éléments principaux connus servant de base au calcul du bilan hydrique sont la hauteur de précipitation P, le débit d'exploitation des eaux souterraines Q<sub>ex</sub> et la variation positive (reconstitution des réserves en eaux souterraines, évaluée d'après le débit des sources ou l'observation de la cote du plan d'eau dans les ouvrages témoins (tableau I).

Tableau I  
 Eléments principaux du bilan hydrique des  
 massifs calcaires du Chennata, Zaghouan et bent Saïdane

apports		dépenses	
Précipitations	P	Evapotranspiration réelle	E
		Ruissellement de surface	R
		Exploitation des eaux souterraines	Q <sub>ex</sub>
Variation de la réserve en eaux souterraines		+	dW

L'expression du bilan hydrique est la suivante :

$$P = E + R + Q_{ex} + dW \quad (1)$$

P est la hauteur de précipitation donnée par les postes pluviométriques (y compris les chutes de neige) ;

E, l'évapotranspiration réelle calculée par différence des autres éléments connus du bilan ;

R, le ruissellement considéré comme négligeable tant que la réserve n'est pas entièrement reconstituée, donc que les sources de déversement ne sont pas alimentées ;

$Q_{ex}$ , le débit d'exploitation mesuré aux captages et aux sources ;

$d_w$ , la variation de la réserve en eaux souterraines connue.

L'élément du bilan, inconnu, est l'évapotranspiration réelle difficile à évaluer directement (l'évaporation Piche est de 1279 mm au Chennata). Cette donnée est calculée à partir de l'infiltration efficace, c'est-à-dire de l'infiltration profonde (ou percolation) qui alimente les eaux souterraines (voir Tableau V).

Précipitations .- Les données de base des postes météorologiques ont permis d'établir le tableau II.

Tableau II - Hauteurs de précipitations en mm. D'après J. TIXERONT et E. BERKALOFF

massif	année hydrologique (septembre-août)					année moyenne (1945-1950)
	1945 1946	1946 1947	1947 1948	1948 1949	1949 1950	
Chennata	579	721	580	617	669	623
bent Saïdane	335	300	483	752	491	472
Zaghouan	304	373	422	706	51	463

Infiltration efficace.- Le ruissellement étant considéré comme négligeable, l'infiltration efficace,  $I_w$ , est calculée à partir de la variation de la réserve en eaux souterraines,  $dW$ , et du débit d'exploitation. Nous avons d'après J. TIXERONT et E. BERKALOFF :

$$I_w \times A = (R_1 - R_0) + Q_{ex} \quad (2)$$

A est la surface du périmètre d'alimentation direct, déterminé par les études hydrogéologiques ;

$R_1$  et  $R_0$ , le volume de la réserve en eaux souterraines au début et en fin de la période considérée ;  $R_1 - R_0 = dW$  ;

$Q_{ex}$ , le volume d'eau exploité au cours de la période considérée.

L'opération essentielle revient donc à déterminer le volume de la variation de la réserve en eaux souterraines.

Calcul de la variation de la réserve en eaux souterraines. Ce calcul est délicat car il repose sur la détermination de la relation entre le volume d'eau souterraine stocké dans la tranche de roche réservoir correspondant à l'amplitude de la fluctuation de la surface du réseau aquifère et l'altitude du plan d'eau mesuré dans les ouvrages témoins ou le débit des sources. En effet, si l'on décompose la masse calcaire en tranches successives, d'un mètre de puissance par exemple, le volume d'eau stocké n'est pas constant d'une tranche à l'autre. En général, il décroît avec la profondeur.

Au djebel Chennata, J. TIXERONT et E. BERKALOFF ont établi une relation entre le volume de la réserve et l'altitude du plan d'eau dans le puits témoin en évaluant le volume d'eau exploité par le captage en période sèche et correspondant aux abaissements successifs par tranches de 2,5 mètres. Une relation a été ensuite établie entre l'altitude du plan d'eau et le volume de la réserve qui lui correspond. Ce volume d'eau emmagasiné décroît avec la profondeur de 27.000 à 13.000 mètres cubes par mètre d'abaissement. Ce phénomène est dû à la diminution de l'ouverture des fissures. Le volume des vides est plus important dans la zone de fluctuation de la surface des eaux souterraines. Le volume total de la réserve est en moyenne de 500.000 m<sup>3</sup> pour un abaissement de 29 mètres, lequel est réglé par la galerie.

Au djebel bent Saïdane la relation, déterminée par la même méthode dans le puits de captage, donne 750.000 m<sup>3</sup> en moyenne par mètre d'abaissement et un volume total de stockage de 4 millions de mètres cubes. Ces données ont été contrôlées par les courbes de tarissement des sources. Au djebel Zaghouan, le volume de la réserve a été calculé par les courbes de tarissement des sources en régime non influencé et par l'exploitation des galeries. Il est de 2.700.000 m<sup>3</sup>.

Les résultats de ces déterminations directes sont exposés dans le tableau III.

Tableau III - Valeurs de la variation de la réserve pour l'année moyenne (période 1945-1950) en millions de mètres cubes.  
D'après J. TIXERONT et E. BERKALOFF

massif	nombre d'années d'observations	volume moyen	volume minimal	volume maximal	fréquence
Chennata	9	0,58	0,346	0,84	1 fois en 9 ans
bent Saïdane	16	1,45	0	4,9	1 fois en 6 ans
Zaghouan	18	3,2	1,8	5	1 fois en 8 ans

Avec ces données (tableau III) sur la variation de la réserve en eaux souterraines, on détermine la hauteur de la lame d'eau infiltrée (tableau IV).

Tableau IV - Hauteur de lame d'eau infiltrée, en mm. D'après J. TIXERONT et E. BERKALOFF

massif	année hydrogéologique (septembre-août)					année moyenne (1945-1950)
	1945 1946	1946 1947	1947 1948	1948 1949	1949 1950	
Chennata	188	382	213	276	257	264
bent Saïdane	70	0	70	390	12	108
Zaghouan	50	100	185	345	150	166

Evapotranspiration réelle.- L'évapotranspiration réelle, le ruissellement étant considéré comme négligeable, est évaluée par différence,

$$E = P - I_w \quad (3)$$

Tableau V - Evapotranspiration réelle rapportée à l'année moyenne, en mm (période 1945-1950). D'après J. TIXERONT et E. BERKALOFF.

massif	P	I <sub>w</sub>	E = P - I <sub>w</sub>
Chennata	633	264	369
bent Saïdane	472	108	362
Zaghouan	463	166	297 (*)

\* la faible valeur de E obtenue pour le Zaghouan, comparée aux autres massifs, provient du fait que pendant deux années consécutives, 1947 et 1948, le ruissellement a été appréciable.

Prévisions du bilan hydrique - bilan hydrique annuel

La relation entre la hauteur de précipitation P et le volume d'eau apporté par l'infiltration efficace,  $I_w$ , est donnée par une formule établie par J. TIXERONT et E. BERKALOFF.

$$I_w = A (P - H_o - aE) \quad (4)$$

- $I_w$  est le volume d'eau apporté par l'infiltration efficace en  $m^3$  ;
- A, la surface du périmètre d'alimentation directe en  $m^2$  ;
- P, la hauteur cumulée de précipitation en m ;
- $H_o$ , la hauteur de la tranche d'eau retenue par le sol (coefficient de rétention) en m ;
- a, un coefficient numérique ;
- E, la hauteur cumulée de l'évapotranspiration en m.

La détermination de  $H_o$  et de a est effectuée à l'aide de graphiques. Les valeurs suivantes ont été obtenues (tableau VI) :

Tableau VI - Valeurs des éléments de la formule (4).

massif	a	$H_o$ (mm)	A ( $m^2$ )	E (mm)
Chennata	0,5	60	1,8	1279
bent Saïdane	0,4	85	17	1400
Zaghouan	0,4	120	20	-

La confrontation des valeurs calculées de l'infiltration efficace avec celles ayant été observées a donné les résultats exposés dans le tableau VII.

Tableau VII - Comparaison des valeurs en mm de  $I_w$  observées avec celles ayant été calculées. La différence, d, en plus ou en moins est exprimée en mm. D'après J. TIXERONT et E. BERKALOFF.

année hydrologique	Chennata			bent Saïdane			Zaghouan		
	$I_w$	différence		$I_w$	différence		$I_w$	différence	
		+	-		+	-		+	-
1945-1946	191	3		65		5	40	10	
1946-1947	359		23	0			80	20	
1947-1948	213		5	53		17	65*	120*	
1948-1949	266		10	380	10		342	3	
1949-1950	262	4		53	39		144		6
moyenne	258		6	110	2		134		32

Les corrélations sont satisfaisantes, sauf pour le Zaghouan en 1947-1948. Cette anomalie est due vraisemblablement au ruissellement.

DJEBEL BARGOU

Le bilan hydrique du djebel Bargou, en Tunisie orientale, a été étudié par H. ZEBIDI.

Cadre hydrogéologique

Le djebel Bargou est un vaste dome constitué de calcaires de l'Aptien supérieur, reposant sur un substratum argileux de l'Aptien inférieur. Il est constitué de deux plis parallèles séparés par une gouttière synclinale faillée, la vallée du Bargou. H. ZEBIDI a étudié plus particulièrement cette vallée, laquelle correspond à un bassin des eaux souterraines bien individualisé.

La couche aquifère calcaire de la vallée du Bargou, holokarst typique, est bien délimitée. L'exutoire des eaux souterraines est représenté en totalité par les sources captées pour l'alimentation en eau de la ville de Tunis : Ain Bou Saadia I, Ain Bou Saadia II et Ain Faouar. Sur une superficie du bassin versant de 55,5 km<sup>2</sup>, on compte 19 km<sup>2</sup> d'affleurements calcaires, 13 de marnes et le reste d'éboulis et brèches de pentes et de limons quaternaires. L'altitude moyenne est de 800 mètres.

Bilan hydrique annuel moyen :

Les éléments principaux de base de calcul du bilan hydrique sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau VIII - Eléments principaux du bilan hydrique annuel moyen du djebel Bargou (période 1949-1960). D'après H. ZEBIDI.

apports		dépendances	
( en millions de mètres cubes )			
Précipitation	P	42,5	
			Evapotranspiration réelle E
			0,5 x 55,5 .10 <sup>6</sup> 28
			Infiltration efficace I <sub>w</sub> 2,5
			Ruissellement R 12,5

Il n'est pas tenu compte de la variation des réserves sur l'année moyenne. D'ailleurs, comme le calcul est effectué avec le débit des sources I<sub>w</sub> = dW. Nous remarquerons que le ruissellement est important. Nous aurons donc comme expression du bilan hydrique :

$$P = E + R + I_w \quad (5)$$

P est le volume d'eau précipité au cours de l'année moyenne mesuré par planimétrie de la carte en courbes isohyètes ;

- E, le volume d'eau dépensé par l'évapotranspiration réelle calculé par la formule de L. TURC ;  
 R, le volume d'eau ruisselé obtenu par différence et contrôlé par des évaluations;  
 I, le volume d'eau alimentant les eaux souterraines (infiltration efficace).  
 W évalué d'après les mesures de débit des sources.

Quelques remarques s'imposent au sujet des valeurs de l'évapotranspiration réelle, de l'infiltration efficace et du ruissellement.

Evapotranspiration réelle - Elle a été calculée d'après la formule de L. TURC, appliquée aux données météorologiques de l'année 1961-1962.

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (6)$$

$$\text{où } L = 300 + 25 T + 0,05 T^3 \quad (7)$$

T, étant la température annuelle moyenne.

Pour T = 18°C et une hauteur de précipitation de 560 mm

$$E = 513 \text{ mm}$$

Cette valeur est trop forte, comparée à celle obtenue pour les autres massifs, en particulier le bent Saïdane située dans les mêmes conditions climatiques.

Infiltration efficace-débit des sources

La totalité du débit des eaux souterraines, correspondant à l'alimentation par l'infiltration efficace, s'écoule par trois sources captées : Ain Bou Saadia I, Ain Bou Saadia II et Ain Faouar. Pour les deux premières, des mesures de débits depuis 1949 permettent de connaître avec précision les volumes d'eau écoulés chaque année et de déterminer le débit annuel moyen (tableau IX).

Tableau IX - Débits annuels moyens en millions de mètres cubes des sources d'Ain Bou Saadia I et II. D'après H. ZEBIDI.

période de référence	P annuelle moyenne à Saadia (mm)	débit annuel moyen (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	
		Ain Bou Saadia I	Ain Bou Saadia II
1949-1960 soit 11 ans	715	1	0,8

L'étude des courbes de décrue donnent les résultats suivants (tableau X). Les chiffres obtenus, Q<sub>c</sub> ont été comparés à ceux des débits mesurés, Q<sub>ni</sub>, du tableau IX.

Tableau X - Comparaison des débits annuels mesurés et calculés par les courbes de décrue. D'après H. ZEBIDI.

source étudiée	P (mm)	$Q_m$ (en millions de m <sup>3</sup> )	$Q_c$	$Q_c / Q_m$
Ain Bou Saadia I	666	1,298	0,349	0,27
Ain Bou Saadia II	666	0,827	0,223	0,27

Ainsi pour les deux sources de Bou Saadia, l'évaluation de la réserve en eaux souterraines par les courbes de décrue ne représente que 27% de la réserve totale annuelle moyenne écoulée à la source. Ces résultats permettent de calculer le débit écoulé à la source d'Ain Faouar. L'interprétation de la courbe de décrue de la saison sèche 1932 donne 190.000 m<sup>3</sup>, ce qui correspondrait à un volume annuel de 700.000 m<sup>3</sup>.

Tableau XI - Débits annuels moyens écoulés aux sources du Bargou, en millions de mètres cubes. D'après H. ZEBIDI.

source	méthode de détermination	débit annuel moyen (en millions de m <sup>3</sup> )
Ain Bou Saadia I	jaugeage	1,058
Ain Bou Saadia II	jaugeage	0,824
Ain Faouar	calcul	0,7
	<u>Total</u>	<u>2,582</u>

Le volume d'eau infiltré sur la surface des affleurements calcaires, soit 19 km<sup>2</sup>, serait donc d'environ 2.580.000 mètres cubes, soit une hauteur de lame d'eau de 135 mm. Ce résultat est comparable aux données obtenues pour les massifs calcaires de la même région.

Ruissellement - Le ruissellement, appréciable, est difficile à évaluer. Une analyse des averses a montré que dans le bilan hydrique établi il était surestimé. Cette remarque conduit à augmenter la valeur de l'infiltration efficace, donc des ressources en eaux souterraines.

CONCLUSIONS

L'étude géologique et hydrologique détaillée des massifs calcaires de Tunisie a permis d'établir des bilans hydriques, base de l'exploitation rationnelle des ressources en eaux. Ceux-ci ont le mérite de reposer sur une connaissance hydrogéologique aussi poussée que possible des bassins d'eaux souterraines et des impluviums, base nécessaire du calcul des réserves.

Les travaux réalisés montrent la possibilité de régulariser les débits d'exploitation en utilisant comme réservoir souterrain naturel la structure hydrogéologique.