Document généré le 1 juin 2025 12:20

Revue des sciences de l'eau
Journal of Water Science

Apports des traçages artificiel et naturel à la connaissance des circulations et des zones de recharge en région semi-aride: cas de l'Atlas de Beni Mellal (Maroc)

Contribution of artificial and natural tracers to the knowledge of flow and recharge in a semi-arid region: the case of Beni Mellal Atlas (Morocco)

L. Bouchaou, P. Chauve, J. Mania, J. Mudry et J. L. Michelot

Volume 8, numéro 1, 1995

URI : https://id.erudit.org/iderudit/705212ar
DOI : https://doi.org/10.7202/705212ar

Aller au sommaire du numéro

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)
1718-8598 (numérique)

Découvrir la revue

Citer cet article

Bouchaou, L., Chauve, P., Mania, J., Mudry, J. & Michelot, J. L. (1995). Apports des traçages artificiel et naturel à la connaissance des circulations et des zones de recharge en région semi-aride: cas de l'Atlas de Beni Mellal (Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, *8*(1), 43–55. https://doi.org/10.7202/705212ar

Résumé de l'article

Pour mieux comprendre les modalités d'alimentation des sources de l'Atlas, des campagnes de coloration et d'analyses isotopiques ont été effectuées sur l'ensemble des sources. La disparité des circulations, la variabilité des vitesses et des taux de restitution, révèlent un aquifère complexe ou à plusieurs entrées. La majorité des écoulements convergent vers la source de Ain Asserdoune qui constitue une zone d'abaissement d'axe de plis. L'étude isotopique montre la variation des teneurs en 180 avec l'altitude des zones de recharge des différents exutoires et avec la saison. Les gradients définis autorisent la détermination de l'altitude moyenne des impluviums des systèmes jusqu'alors mal connus, en particulier celui de l'exutoire principal du massif, Ain Asserdoune.

Tous droits réservés © Revue des sciences de l'eau, 1995

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne.

https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/

Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche.

https://www.erudit.org/fr/

REVUE DES SCIENCES DE L'EAU, 8(1995) 43-55

Apports des traçages artificiel et naturel à la connaissance des circulations et des zones de recharge en région semi-aride : cas de l'Atlas de Beni Mellal (Maroc)

Contribution of artificial and natural tracers to the knowledge of flow and recharge in a semi-arid region : the case of Beni Mellal Atlas (Morocco)

L. BOUCHAOU[1], P. CHAUVE[2], J. MANIA[2], J. MUDRY[2] et J.L. MICHELOT[3]

Reçu le 22 mars 1994, accepté le 3 novembre 1994*.

SUMMARY

The chalky massif of Beni-Mellal, which supplies many springs, spreads over a 365 km² area of 500 to 2,400 meters elevation (average altitude, 1,200 m). Rainfall in this sector varies between 400 mm and 700 mm/year. All springs emerge along the major coastal fault giving the Liassic massif overthrushing the Cenozoic lands of piemont. The most important is Ain Asserdoune spring with an average discharge of about 1.1 m³/s. The mainly chalky and dolomitic formations are very fractured according to preferential directions (N150-180 and N50-70) and show some karstification features at the surface. Some tracing experiments with fluorescein allowed the delimitation of the boundaries of the intake area of Ain Asserdoune Basin and the determination of the groundwater flow velocity. Two types of flow were identified with fast (100 to 231 m/h) and slow circulation (< 100 m/h). Most of circulations converge towards the spring of Ain Asserdoune *(fig. 1)* with an important intake area. This convergence results from an axis lowering. The variability of the circulation axes, the velocity and the rate of restitution suggest either a complex aquifer or an aquifer with several inputs.

Two water samplings (the first for the Beni Mellal Atlas) were carried out in March and in September 1993 on the several springs, in order to study the variations of the oxygen-18 isotope. The oxygen-18 contents range between – 5.5‰ and – 7.7‰ *(table 2)*. The most depleted waters directly exit from the Liassic aquifer or emerge at high altitudes; those which are richer in oxygen-18 emerge at the level of foothills, either from the Tertiary or from Liassic scales. The relationship between the oxygen-18 and the H-2 content of some samples indicates that the points are aligned along the world meteoric line (Craig, 1961). Even if the waters of Dir (piemont) springs are slightly evaporated because they partly originate in seeping Liassic waters, oxygen-18 content is probably mainly

1. Labo. Géol. Appl. Faculté des Sciences, BP S/28, 80000 Agadir, Maroc.
2. Labo. Géol. Struct. et Appl. 1 place Leclerc, 25000 Besançon, France.
3. Labo. d'Hydrologie et de Géochimie isotopique, Bat. 504, 91504 Orsay Cedex, France.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 15 novembre 1995.

controlled by an altitude effect. Oxygen-18 data for local precipitations are not available ; however, a local relationship between oxygen-18 content and mean recharge altitude was etablished for eleven (11) springs with small recharge areas whose mean altitude may be estimated from topography and geology. Oxygen-eighteen ratio is very well correlated to recharge average elevation for spring samples (δ‰ (O – 18) = – 3 – 0,0026 x altitude, r = 0,96 ; *fig. 3*), when it is not for autumn samples. This gradient is very close to the regional relationship proposed by Marce (1975) and Kabbaj *et al.* (1978) (slope : 3‰ in oxygen-18 per 1,000 m). This difference is attributed to the seasonal variations in the origin of water that feeds the springs. In the high water season, the whole basin area contributes to the recharge. In contrast, during low water period, water mainly originates from altitudes higher than the mean altitude of the basin, probably with a longer transit time. The seasonal variations are particularly marked for the Dir (piemont) springs (with a lower flux and intake area range of 800 to 1,200 m). They are weaker for the Lias springs and even non-existent for the main spring of the massif, Ain Asserdoune. In this latter case, the smoothing (– 7.6‰ and – 7.5‰) of seasonal variation (which is also observed for temperature : 15.5 to 16°C) gives evidence of important water reserves. A mean recharge altitude higher than 1,700 m may be proposed for Ain Asseroune.

Based on this analysis, some emergences which in the part were assigned to the same hydrologic system can now be discriminated. On the other hand, with a similar value of oxygen-18 ratio, rather distant springs can be considered as belonging to the same hydrogeological Atlasic unit. So the relationship which was quantified (slope : 2.6‰ in oxygen-18 per 1,000 m) is usable for the whole Atlasic range on account of regionaly similar weather. The methodology selected in this work corroborates the results obtained by hydrometric analysis concerning the very important groundwater reserves in the Beni Mellal aquifer.

Key-words : *tracer, spring, velocity, aquifer, environmental isotope, intake area, gradient, recharge altitude, reserves.*

RÉSUMÉ

Pour mieux comprendre les modalités d'alimentation des sources de l'Atlas, des campagnes de coloration et d'analyses isotopiques ont été effectuées sur l'ensemble des sources. La disparité des circulations, la variabilité des vitesses et des taux de restitution, révèlent un aquifère complexe ou à plusieurs entrées. La majorité des écoulements convergent vers la source de Ain Asserdoune qui constitue une zone d'abaissement d'axe de plis. L'étude isotopique montre la variation des teneurs en ^{18}O avec l'altitude des zones de recharge des différents exutoires et avec la saison. Les gradients définis autorisent la détermination de l'altitude moyenne des impluviums des systèmes jusqu'alors mal connus, en particulier celui de l'exutoire principal du massif, Ain Asserdoune.

Mots clés : *traçage, source, vitesse, aquifère, isotope du milieu, altitude, recharge, bassin d'alimentation, gradient, réserves.*

1 – CARACTÉRISTIQUES DE LA RÉGION ÉTUDIÉE

Le massif calcaire de l'Atlas de Beni Mellal se situe sur la bordure septentrionale de la chaîne atlasique. Son bassin versant topographique

présente une superficie de 365 km^2. La morphologie montre un étagement des altitudes entre 500 m (piémont appelé Dir) et 2 400 m (montagne), avec une altitude moyenne de 1 200 m. Du point de vue climatique, la région reçoit une pluviométrie moyenne allant de 400 mm (plaine-piémont) à 700 mm (en montagne). Les chutes de neige varient d'une année à l'autre, mais en général elles accompagnent les pluies d'hiver et peuvent persister jusqu'à fin mars au delà de 1 500 m d'altitude. La température moyenne est de l'ordre de 19 °C, les variations saisonnières sont importantes et l'amplitude journalière peut atteindre 20 °C. Les pluies efficaces sont de l'ordre de 100 mm sur la plaine et le Dir et de 300 mm en montagne. L'aquifère contenu dans ce massif donne naissance à de nombreuses sources *(fig. 1 et tabl. 2)* dont la plus importante est celle de Ain Asserdoune (Qmoy. = 1,1m^3/s) qui constitue la ressource principale en eaux potable et agricole de la région. La structure montre un anticlinal ouvert qui chevauche vers le nord-ouest. Les différentes sources émergent en général au contact du chevauchement nord atlasique *(fig. 1)*. Le système a fait l'objet d'études géologiques (MONBARON, 1982, 1985) et hydrogéologiques (BOUCHAOU, 1988). Les formations du Lias inférieur et moyen sont à dominante calcaire et dolomitique. L'étude de la fracturation a montré deux fourchettes directionnelles (N 150-180 et N 50-70) qui peuvent guider probablement l'écoulement souterrain. Le faciès chimique des eaux est bicarbonaté calcique.

2 – MÉTHODES UTILISÉES

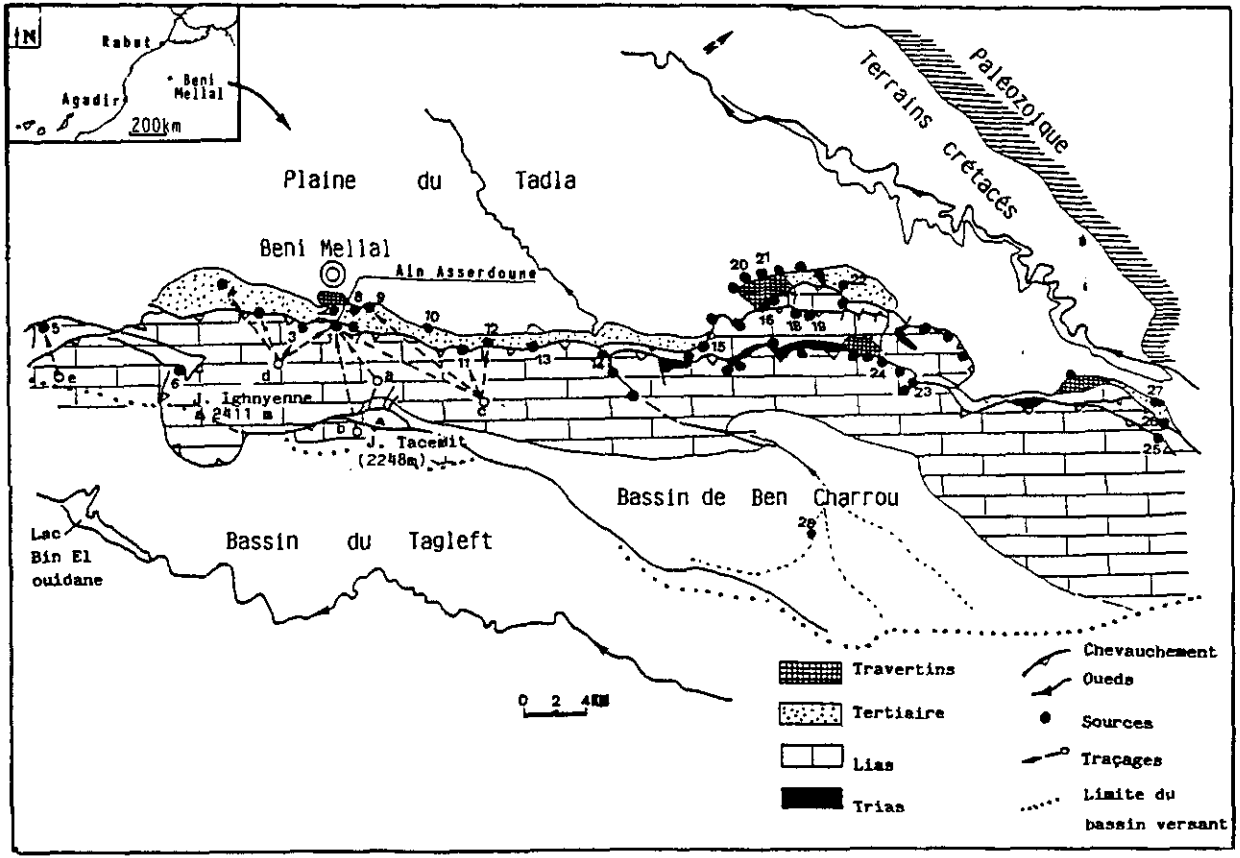
Dans le cadre de ce travail, nous avons fait appel aux méthodes des traçages artificiel et naturel :

Des traçages à la fluorescéine ont été réalisés dans le massif afin de déterminer, le mode de circulation de l'aquifère (écoulement rapide ou retardé), le bassin d'alimentation de la source Ain Asserdoune et les relations avec les autres sources. En l'absence de perte localisée, cinq points d'injection répartis dans le massif ont été choisis (trous absorbants ou lits de ruisseaux). La surveillance des différentes sources et l'analyse des échantillons et des fluocapteurs révèlent la relation entre les points d'injection et les exutoires. Les taux et la forme des courbes de restitution renseignent sur les formes de décroissance plus ou moins rapide résultant de divers facteurs (dispersion hydraulique liée aux pertes de charge, diffusion, adsorption-désorption).

Une étude des teneurs en isotopes stables de l'eau, a été effectuée dans le but d'acquérir une meilleure connaissance des circulations et des zones de recharge.

Les analyses isotopiques ont été effectuées au laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique d'Orsay (Université Paris sud) dans le cadre d'un stage financé par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (IAEA). Parmi les méthodes de l'hydrologie isotopique, celles fondées sur l'étude des

Figure 1 Carte hydrogéologique de l'Atlas de Beni Mellal (points échantillonnés avec numéro).
Hydrogeological map of the Beni Mellal Atlas. (sampling point with number).



variations naturelles des teneurs en isotopes constitutifs de la molécule d'eau sont devenues d'un usage courant (FONTES, 1976 ; MOLINARI,1977 ; IAEA, 1981). Elles sont particulièrement adaptées aux régions caractérisées par de rapides et importantes variations d'altitude et/ou soumises à des conditions climatiques très marquées (ARANYOSSY, 1989), comme l'Atlas de Beni Mellal qui présente près de 2 000 m de dénivelée. L'estimation des altitudes de recharge des aquifères est l'une des principales applications de ces méthodes (voir par exemple, pour les milieux karstiques, BAKALOWICZ *et al.*, 1974 ; BLAVOUX *et al.*, 1979 et 1990), qui revêt un intérêt particulier dans le cas de l'Atlas où les aires d'alimentation des sources sont mal connues. La variabilité saisonnière et spatiale aura un effet important dans l'utilisation des teneurs isotopiques pour la détermination des aires de recharge.

3 – RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

3.1 Traçage artificiel

Les campagnes de coloration réalisées pour la première fois dans l'Atlas de Beni Mellal (BOUCHAOU *et al.*, 1988) avaient pour but principal la délimitation du bassin d'alimentation de la source d'Ain Asserdoune. Sur la figure 1, on constate que la majorité des circulations convergent vers la source principale. Ce phénomène s'explique par le fait que la source se situe dans une inflexion du chevauchement nord atlasique (forme de gouttière) et sur un substratum triasique imperméable ; ce qui justifie l'importance des débits. Ce mode de circulation lié à un abaissement d'axe a été déjà mis en évidence dans le Jura français (CHAUVE *et al.*, 1986). La coloration (b) réalisée au delà de la limite topographique *(fig. 1)* indique un bassin hydrogéologique plus vaste que le bassin topographique.

Le tableau 1 résume les résultats des colorations effectuées. L'analyse de ces résultats montre deux types de circulations :

– des circulations rapides (100 à 231 m/h) qui s'expliquent par une mise en charge à l'occasion d'apports importants au système pendant les périodes de hautes eaux. Le débit de la source a relativement augmenté (900l/s à 1 000l/s). Ce transfert rapide et le taux de restitution élevé caractérisent des circulations dans un système de chenaux (MANGIN, 1975). La faible dilution implique l'absence de réservoirs le long du trajet : le passage du colorant peut être localisé à la surface de la zone noyée. Ceci s'explique par une circulation à travers un karst superficiel bien développé et une dénivellation importante (600 m) ;

– des circulations lentes avec des vitesses de circulations inférieures à 100 m/h montrent que le colorant emprunte un réseau karstique mal développé en raison de l'absence d'un cheminement direct vers l'exutoire. Ce phénomène observé généralement en période d'étiage s'expliquait par le caractère peu transmissif de la zone noyée soit par un transit dans des systèmes annexes constituant les réserves du système. Durant les colorations réalisées en étiage, le débit est resté constant.

Tableau 1 Résultats des traçages artificiels effectués dans le massif de Beni Mellal.

Table 1 *Results of artificial tracer in Beni Mellal massif.*

Coloration	Coordonnées du point d'injection	Quantité injectée en (kg)	Points de sorties	Vitesse des circulations en m/h			Taux de restitution	Observations
				rapide	modale	lente		
a	X = 418.000 Y = 191.000 Z = 1 450	2,8	1. Asserdoune 2. Tamegnounte	231 98	125 –	22 44	75 %	Injection dans un aven avec un débit de 1 l/s
b	X = 425.000 Y = 186.000 Z = 1 200	4,3	1. Asserdoune	164	115	80	13 %	Injection dans le lit d'un ruisseau (2 l/s)
c	X = 425.000 Y = 195.000 Z = 1 250	2	1. Asserdoune 11. F. El ancer 9. Ksabi	167 125 173	–	–	–	Injection au fond d'une dioline dans un volume d'eau de 400 l
d	X = 410.000 Y = 190.500 Z = 1 200	2,3	1. Asserdoune 3. Ourbiaâ 4. Foum Oudi	229 114 188	–	–	17 %	Coloration suivie d'une pluie dans un trou absorbant
e	X = 404.000 Y = 177.000 Z = 1 100	0,3	5. Timoulilt	50	–	10	–	Injection dans une carrière

La dispersion des directions de drainage concorde avec les directions de fractures dominantes (N50-70 et N150-180). La forme des courbes de restitution montre généralement quelques pics en périodes de crue, alors qu'en étiage les courbes sont très étalées. Le temps de restitution du colorant dans les eaux de la source principale varie entre 6 et 11 jours. Toutefois, les variations des vitesses et des taux de restitution suggèrent un système à fonctionnement complexe et à perméabilité hétérogène.

La sortie du colorant au niveau d'autres sources indique aussi un écoulement dispersif et mal organisé, ce dont témoignent les nombreux exutoires sortant du système.

3.2 Traçage naturel (Teneurs en Oxygène-18)

Dans le but d'avoir plus de précision sur les bassins d'alimentation des différentes sources et de vérifier les résultats du traçage artificiel, deux campagnes de prélèvements pour analyses isotopiques ont été réalisées, l'une au mois de mars 1993 (hautes eaux) et l'autre au mois de septembre 1993 (basses eaux). L'échantillonnage de mars est effectué après un événement pluvieux, alors que celui de septembre est réalisé après une longue période sèche.

Sur l'ensemble des eaux analysées, les teneurs en oxygène-18 varient entre – 5,1 ‰ et – 7,7 ‰ vs SMOW (*tabl. 2*). Les eaux les plus pauvres sortent directement de l'aquifère liasique ou émergent à de hautes altitudes, les plus riches sourdent en général au niveau du piémont, soit du Tertiaire soit des

écailles liasiques *(fig. 4)*. Les eaux des sources du Dir peuvent être légèrement évaporées lors d'un séjour en surface car ce sont en partie des eaux du Lias qui se réinfiltrent pour apparaître ensuite au niveau du piémont. La corrélation entre les teneurs en oxygène-18 et les teneurs en deutérium de quelques échantillons *(fig. 2)* montre que les points s'alignent selon la droite météorique mondiale (CRAIG, 1961). L'effet isotopique dû à l'évaporation est donc probablement négligeable devant celui induit par les variations des altitudes de recharge.

Tableau 2 Résultats des analyses isotopiques des sources de l'Atlas de Beni Mellal.

Table 2 *Results of isotopic analysis of Beni Mellal Atlas springs.*

Sources échantillonnées	N° IRE	Altitude de la source (m)	Débit moyen en l/s	Altitude estimée du BV (en m)	Teneur en Oxygène-18 (delta ‰) mars 93	Teneur en Oxygène-18 (delta ‰) sep. 93	Deutérium (delta ‰) mars 1993	Formation géologique à l'exutoire
1. Ain Asserdoune	210/37	647	1 100		−7,5	−7,5	−48,6	Lias
2. Tamegnounte	1505/37	540	137	1 350*	−6,7	−7,4	−42,5	Travertin Dir
3. Ourbiaâ	1885/37	720	103	1 360*	−6,5	−6,5	–	Dir
4. Foum Oudi	247/37	540	35		−5,8	−6,1	–	*
5. Timoulilt	249/37	580	70	1 260*	−6,3	−6,9	−37,1	*
6. Ait Aâmira		1 250	3		−5,8	–	–	Bathonien
7. El ghazi	1507/37	670	5		−5,9	–	–	Dir
8. S. Bouyakoub	1565/37	556	25	1 300*	–	−7,2	–	*
9. Ksabi	1770/37	550	15	1 250*	−6,1	−6,3	−39,3	*
10. Zitoune	1773/37	640	15		−6,1	–	–	*
11. Foum El ancer	258/37	650	125		−5,0	−6,7	–	*
12. Fechtalla	1677/37	695	124		−5,4	–	−34,4	*
13. Fariata	1393/37	650	7		−5,2	–	–	*
14. Tazeroualte	1959/37	700	20	1 050*	−5,7	−6,6	–	*
15. Tamoudjoute	1765/37	694	57		–	−7,7	–	Lias
16. Ain Oudaine	1765/37	640	143		−5,5	−6,6	–	Dir
17. Sidi B. Daoud	1683/37	680	69		−5,1	–	–	*
18. Ouâcha	1499/37	790	85		−5,6	−6,8	–	*
19. Ousafrou	1500/37	820	175	1 030*	−5,9	−7,1	−38,6	*
20. Gorm Nih	1796/37	565	11	1 010*	−5,5	−6,7	–	*
21. Ait Daoud	1800/37	585	19	1 020*	−5,7	−6,6	–	*
22.Ouhriche	1867/37	680	20	860*	−5,1	−6,1		*
23. Taghbaloute	1627/37	1 145	15	1 360*	−6,4	−7,4	−41,8	Lias
24. Moha O'Khty	1462/37	1 064	51		−6,1	–	–	*
25. Tamda amont	361/37	720	220		−6,6	−7,7	−44,3	Lias
26. Tamda aval		700	100		−6,7	–	–	*
27. Ouar n'faâ		600	120		–	−7,6	–	*
28. Ain Sidi Said		1 300	5		–	−7	–	Crétacé Atlas

* Valeurs utilisées dans la figure 3.

** Values used in figure 3.*

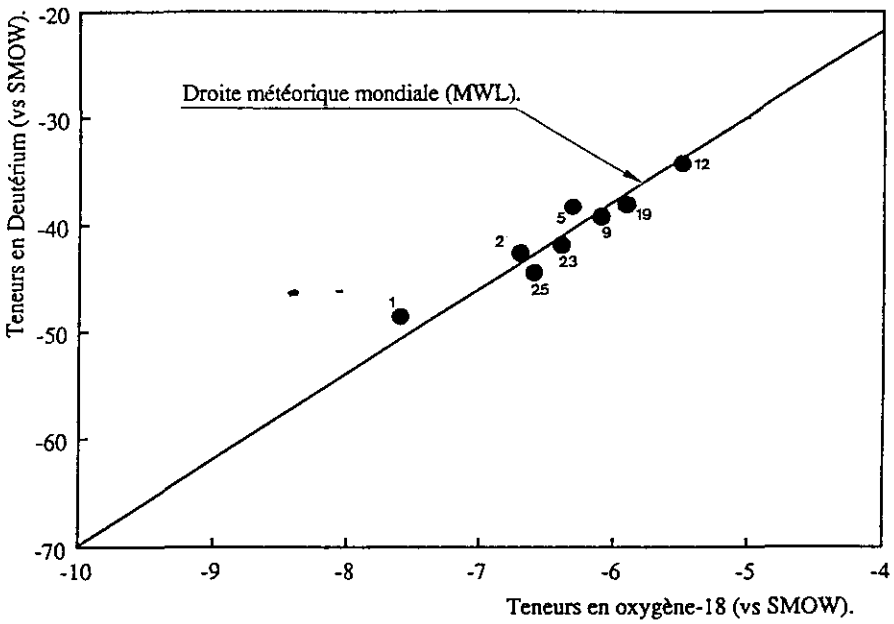


Figure 2 Relation entre teneurs en deutérium et teneurs en Oxygène-18 (mars 93).

Relationship between deuterium contents and oxygen-18 contents (March 93).

Le gradient de variation des teneurs en isotopes stables doit, en toute rigueur, être établi à partir des mesures sur les échantillons de précipitations collectées à différentes altitudes dans la région supposée de la recharge, et sur plusieurs années. Ne disposant pas de cette collection d'échantillons, nous avons tenté de vérifier la validité régionale du gradient en O-18 (0,3 ‰ par 100 m) proposé par MARCE (1975) et KABBAJ *et al.* (1978) et qui a été établi sur les précipitations dans les régions de l'Atlas.

Vu l'étendue du bassin d'alimentation des sources et la difficulté rencontrée pour délimiter le bassin versant de chacune d'elles, il est possible, d'après les profils topographiques et géologiques, d'estimer l'altitude moyenne du bassin d'alimentation. Cette estimation a été réalisée pour onze sources, réparties sur le chevauchement nord – atlasique sur une distance de 70 km et dont le bassin versant n'est à priori, ni trop tourmenté ni trop étendu. Les altitudes estimées ont ensuite été mises en relation avec les teneurs en oxygène-18 des eaux écoulées par les sources considérées, en mars et en septembre *(fig. 3)*.

On remarque que les eaux de la campagne de mars s'alignent sur la droite de MARCE et pas celles de septembre. La variation de la teneur en O-18 des eaux de sources prélevées en mars (période pluvieuse) correspond à un gradient altitudinal 0,26 ‰ par 100 m *(fig. 3)*. En revanche, les points représentatifs des échantillons prélevés en septembre (période d'étiage) sont

beaucoup plus dispersés. Les teneurs en oxygène-18 sont bien corrélées aux altitudes moyennes de recharges pour les échantillons du printemps : δ ‰ (O-18) = – 3 – 0,0026 x altitude, r = 0,96 (mars 93 : hautes eaux) ; elles ne le sont pas avec celles de l'automne.

Il est difficile d'admettre que cette variation apparente du gradient puisse trouver son origine dans une variation saisonnière de la teneur en oxygène-18 des précipitations à une même altitude. Il semble donc que ce soit l'altitude de la recharge apparente qui varie avec la saison, ou plus vraisemblablement, avec l'état « hydraulique » des systèmes aquifères. Ainsi, en période de crue, les eaux écoulées aux sources semblent représenter un mélange des précipitations tombées sur l'ensemble du profil topographique de recharge. En période d'étiage, certaines sources pourraient drainer dans de plus grandes proportions des réserves d'origine plus lointaine, correspondant à des eaux précipitées à une altitude plus élevée que l'altitude moyenne du bassin versant.

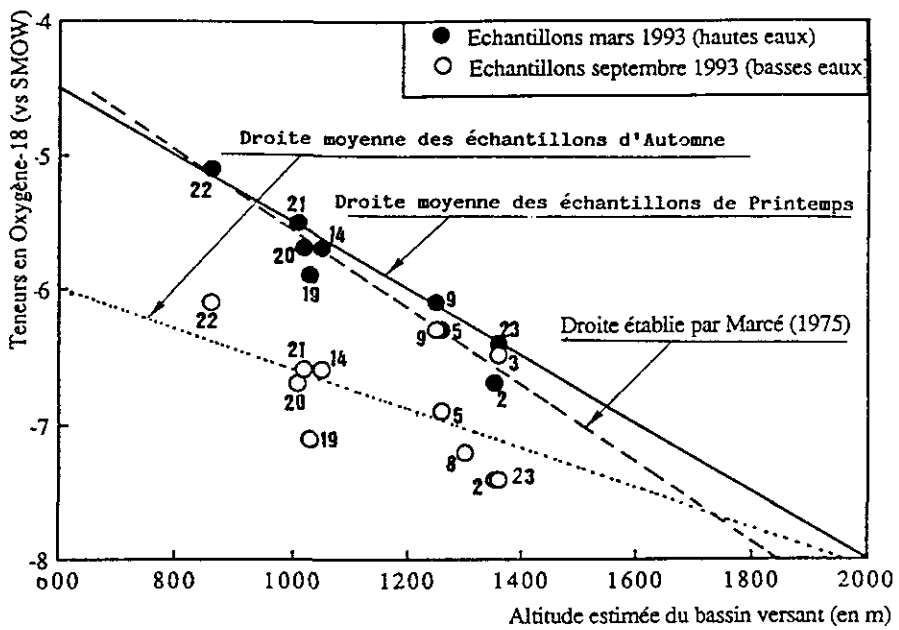


Figure 3 Relation entre teneurs en Oxygène-18 et altitudes moyennes du bassin versant.

Relationship between oxygen-18 contents and average altitude of the catchment basin.

Ces variations saisonnières dans l'alimentation sont particulièrement sensibles pour les sources présentant de faibles débits *(fig. 4 et tabl. 2)*. Elles sont liées au mode de fonctionnement très inertiel du système (temps de régulation de 87 jours et coefficient de tarissement de l'ordre de 10^{-3}, BOUCHAOU *et al.*, 1994 à paraître). Les eaux des sources du Dir proviennent en général d'altitudes moyennes comprises entre 800 et 1 200 m (moyens

plateaux) en période de crue alors que des précipitations de plus hautes altitudes alimentent ces sources en période d'étiage *(tabl. 3)*. Ces précipitations de hautes altitudes sont également à l'origine des eaux écoulées par les sources qui émergent dans le Lias, en période de crue comme en période d'étiage. Parmi les sources du Lias, l'exutoire principal de la région (Ain Asserdoune) ne subit pas de variations saisonnières ; cet effet tampon (qui se trouve également dans les faibles variations de température enregistrées : 15,5 à 16 °C), témoigne de l'existence de réserves importantes. Les teneurs en oxygène-18 (– 7,6 et – 7,5 ‰), très proches en mars et en septembre, permettent de calculer une altitude de recharge moyenne supérieure à 1 700 m correspondant aux massifs de Tacemit et Ighnyenne. Cette altitude est plus

Tableau 3 Comparaison entre les altitudes moyennes de recharge estimées selon la topographie du bassin versant et calculées avec un gradient en O-18 de 0,26 ‰ par 100 m.

Table 3 *Comparison between average estimated altitude of intake area and calculated with an O-18 gradient like 2.6‰ per 1,000 m.*

Sources échantillonnées	Teneur en Oxygène-18 delta ‰ SMOW		Altitude topo. estimée	Altitude de recharge isotopique (en m)		Formation géologique à l'exutoire
	mars 93	sept. 93	du BV (en m)	mars 93	sept. 93	
1. Ain Asserdoune	– 7,6	– 7,5		1 770	1 730	Lias
2. Tamegnounte	– 6,7	– 7,4	1 350	1 430	1 670	Travertin Dir
3. Ourbiaâ	– 6,5	– 6,5	1 360	1 330	1 350	Dir (piémont)
4. Foum Oudi	– 5,8	– 6,1		1 080	1 190	"
5. Timoulilt	– 6,3	– 6,9	1 260	1 280	1 520	"
6. Ait Aâmira	– 5,8	–		1 080		Bathonien
7. El ghazi	– 5,9	–		1 120		Dir
8. S. Bouyakoub	–	– 7,2	1 300		1 610	"
9. Ksabi	– 6,1	– 6,3	1 250	1 200	1 270	"
10. Zitoune	– 6,1	–		1 200		"
11. Foum El ancer	– 5,0	– 6,7		790	1 420	"
12. Fechtalla	– 5,4	–		950		"
13. Fariata	– 5,2	–		870		"
14. Tazeroualte	– 5,7	– 6,6	1 050	1 060	1 390	"
15. Tamoudjoute	–	– 7,7			1 790	Lias
16. Ain Oudaine	– 5,5	– 6,6		960	1 400	Dir
17. Sidi B. Daoud	– 5,1	–		820		"
18. Ouâcha	– 5,6	– 6,8		1 010	1 480	"
19. Ousafrou	– 5,9	– 7,1		1 110	1 570	"
20. Gorm Nih	– 5,5	– 6,7	1 010	970	1 440	"
21. Ait Daoud	– 5,7	– 6,6	1 020	1 040	1 400	"
22.Ouhriche	– 5,1	– 6,1	860	810	1 200	"
23. Taghbaloute	– 6,4	– 7,4	1 360	1 310	1 680	Lias
24. Moha O'Khty	– 6,1	–		1 200		"
25. Tamda amont	– 6,6	– 7,7		1 380	1 800	Lias
26. Tamda aval	– 6,7	–		1 410		"
27. Ouar n'faâ	–	– 7,6			1 750	"
28. Ain Sidi Said	–	– 7			1 550	Crétacé Atlas

élevée que celle fournie par les simples observations topographiques, ce qui montre le peu de fiabilité de ce type d'informations dès lors que le bassin versant atteint une certaine étendue.

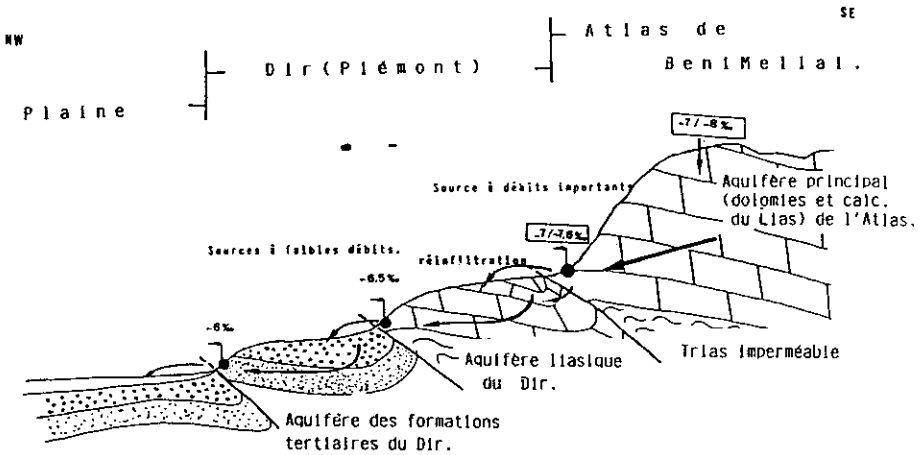


Figure 4 Schéma de circulation des eaux sur le piémont de l'Atlas de Beni Mellal.
The water circulation diagram in piemont of Beni Mellal Atlas.

4 – CONCLUSION

L'analyse des résultats des traçages artificiels montre que les axes de drainage sont multiples, dont l'écoulement majeur converge vers la source d'Ain Asserdoune qui constitue une zone d'abaissement d'axe. Son bassin d'alimentation doit être étendu à l'ensemble du massif.

Les variations des teneurs en O-18 sont essentiellement interprétées en termes de différences d'altitudes de recharge. Le gradient altitudinal en O-18, estimé à 0,26 ‰ par 100 m, est très voisin de celui proposé par MARCE (1975) (0,3 ‰ par 100 m). Sa validité régionale est ainsi confirmée. Les précipitations sur les moyens plateaux (800 à 1 200 m) participent à l'alimentation des sources du Dir pendant les périodes de hautes eaux. Au contraire, ces sources sont majoritairement alimentées par les précipitations de haute altitude (> 1 700 m) en période d'étiage. Les variations saisonnières sont moins sensibles pour les sources du Lias et sont même totalement inexistantes pour l'exutoire principal du système, Ain Asserdoune, qui dispose probablement de réserves importantes, alimentées à une altitude moyenne supérieure à 1 700 m.

Par ailleurs, cette méthode confirme les résultats obtenus à partir des analyses hydrométriques qui ont montré un écoulement inertiel et complexe. Les résultats de ces campagnes isotopiques sur les sources de l'Atlas

montrent l'utilité de cette technique isotopique pour la prospection d'une région karstique en zone semi-aride. Dans ce contexte climatique, l'existence d'étiages prolongés constitue une condition favorable à l'échantillonnage d'eaux représentatives de la réserve des systèmes, permettant la comparaison des altitudes d'infiltration de leur pluie efficace. Dans le contexte de Beni Mellal, la constance des teneurs en oxygène-18 a permis de confirmer l'inertie du système. Appliquée à d'autres sources, l'analyse des variations de teneurs en isotopes stables devrait permettre d'accéder directement au fonctionnement du système.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'Agence Internationale d'Energie Atomique (AIEA) pour l'aide financière attribuée à Mr Bouchaou, ce qui nous a permis d'effectuer les analyses isotopiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARANYOSSY J.F., 1989. Quelques exemples pratiques d'application des isotopes de l'environnement aux études hydrogéologiques. *Hydrogéologie, 3,* 159-166.

BAKALOWICZ M., BLAVOUX B., MANGIN A., 1974. Apports du traçage isotopique naturel à la connaissance du fonctionnement d'un système karstique – Teneurs en oxygène-18 de trois systèmes des Pyrénées. France. *J. Hydrol., 23,* 141-158.

BLAVOUX B., MUDRY J., 1990. Les teneurs en oxygène-18 en fonction de l'altitude des impluviums des réservoirs karstiques du Jura et du Vaucluse. *Mem. of the 22nd Congress of AIH,* XXII, 330-338, Lausanne.

BLAVOUX B., BURGER A., CHAUVE P., MUDRY J., 1979. Utilisation des isotopes du milieu à la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura. *Rev. Géol. Dyn. Géog. Phys., 21,* 4, 295-306, Paris.

BOUCHAOU L., 1988. Hydrogéologie du bassin des sources karstiques du complexe calcaire haut-atlasien du Dir de Beni Mellal (Maroc). Doct. Univ. Franche Comté, 179 p - Besançon.

BOUCHAOU L., CHAUVE P., MANIA J., FERRANDINI J., 1988. Structure et hydrologie de l'aquifère de l'Atlas de Beni Mellal. 4e Coll. Hydro. en Pays Calc., *Ann.. Scientif. Univ. Besançon,* Géol. H.S, *6,* 211-220.

BOUCHAOU L., CHAUVE P., MANIA J., MANGIN A., ABOUFIRASSI M., 1994. Contribution à l'étude du fonctionnement hydrodynamique d'un système aquifère karstique en zone-aride : exemple de l'Atlas de Beni Mellal (Maroc).Gèodynamica Acta (à paraître).

CHAUVE P., MUDRY J., ROSENTHAL P., TISSOT, TRESSE Ph., 1986. Rôle des abaissements d'axe dans les circulations karstiques du Jura. *Bull. Soc. Géol. France* t. II, n° 2, pp. 329-336.

CRAIG H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. Science, vol. 133, p. 1702-1703.

FONTES J.Ch., 1976. Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse Doct. Etat, ès Sc. Nat. Univ. P. et M. Curie, Paris VI.

IAEA, 1981. Stable Isotope Hydrology – Deuterium and Oxygen-18 in water cycle. Technical reports series 210, Vienna (Austria).

KABBAJ A., ZAYOUHI I., CARLIER Ph., MARCE A., 1978. Contribution des isotopes du milieu à l'étude des grands aquifères du Maroc. *Isot. Hydrol.*, IAEA, II, SM., 228/25, Vienne (Autriche).

MANGIN A., 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doct. Sc. Nat. Dijon, France.

MARCE A., 1975. Contribution des méthodes isotopiques à l'étude des modalités d'alimentation et de renouvellement des réserves souterraines du Maroc. SGN. 447, LAB. B.R.G.M., Orléans.

MOLINARI J., 1977. Quelques remarques pratiques et une présentation commode facilitant l'exploitation des variations naturelles en deutérium et en oxygène-18 dans les eaux. *J. of Hydrol* , *32*, pp. 383-392.

MONBARON M., 1982. Précisions sur la chronologie de la tectogénèse atlasique. *C. R. Acad. Sc. Paris, 294,* II : 883-885.

MONBARON M., 1985. Carte géologique du Maroc au 1/100 000. Feuille de Beni Mellal. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc* , *341*, Rabat.