

Département de Géologie Ecole Nationale de l'Industrie Minérale Rabat- Maroc



Service d'Hydrogéologie Université de Liège Belgique

CARTE HYDROGEOLOGIQUE DU PLATEAU D'OULMES (MAROC)

Notice explicative

D.Elbatloussi M. Cheddadi S.Dadi I.Ruthy Ph.Orban A.Dassargues

Février 2005



Projet d'Initiative Propre (PIP) Etudes des potentialités, de la vulnérabilité et de la protection des ressources en eau des aquifères fissurés en zone semi-aride au Maroc financé par la Commission Universitaire pour le Développement (CUD), Belgique

Avant-propos

La carte hydrogéologique du plateau d'Oulmès a été réalisée dans le cadre d'un Projet d'Initiative Propre (PIP) portant sur l'"Etudes des potentialités, de la vulnérabilité et de la protection des ressources en eau des aquifères fissurés en zone semi-aride au Maroc" en coopération entre le secteur d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement du Département GEOMAC de l'Université de Liège et le Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Ecole Nationale de l'Industrie Minérale (ENIM, Rabat, Maroc) et qui a été financé par la Commission Universitaire pour le Développement (CUD). Ce projet a été supervisé par le professeur A. Dassargues, promoteur responsable du projet, le professeur S. Dadi, interlocuteur-responsable du projet. La carte réalisée est le fruit du travail d'un groupe de chercheurs du Laboratoire d'Hydrogéologie de l'ENIM : D. Elbatloussi, F.Laziri et M. Cheddadi en collaboration avec l'équipe d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement du Département GEOMAC de l'Ulg et plus particulièrement I. Ruthy et P. Orban.

Les données nécessaires pour accomplir cette étude ont été fournies par des études réalisées dans le cadre de ce projet (PIP) et ont été collectées auprès de partenaires marocains, à savoir l'Office Nationale des Eaux Potables (ONEP), le Centre de Travail (CT) d'Oulmès, la société ARBOR, la ferme de Bensaleh et l'Administration de l'Hydraulique. Qu'ils en soient tous remerciés.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	4
I- CADRE GEOGRAPHIQUE	5
II- CADRE GEOMORPHOLOGIQUE	7
II.1- Massif granitique	8
II.2- Etendues schisteuses	8
III- CADRE GEOLOGIQUE	9
III.1- Contexte lithologique	9
III.1.1- Formation cristalline	9
III.1.2- Formation volcanique	10
III.1.3- Formations cristallophylliennes	10
III.1.4- Formations superficielles	11
III.2- Contexte tectono-métamorphique	12
III.2.1- Phase anté-viséenne supérieure	12
III.2.2- Phase majeure hercynienne	12
III.2.3- Déformation métamorphique	12
IV- CADRE HYDROLOGIQUE	15
IV.1- Hydrologie	15
IV.2- Caractéristiques des bassins versants	15
IV.3- Estimation du bilan hydrologique	17
V- CADRE HYDROGEOLOGIQUE	19
V.1- Unités hydrogéologiques	19
V.1.1- Critères de regroupement	19
V.1.2- Unités hydrogéologiques	19
V.2- Données piézométrique	22
V.2.1- Cartes piézométriques	22
V.2.2- Fluctuations piézométriques en fonction du temps	23

VI- PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES	26
VI.1- Essais réalisés en 1982	26
VI.1.1- Essais à l'air lift	27
VI.1.2- Essais de pompage	28
VI.2- Essais réalisés en juillet 2003	29
VII- CADRE HYDROCHIMIQUE	31
VII.1- Définition de faciès	31
VII.2- Caractérisation hydrochimique des eaux dans l'aquifère des arènes granitiques	35
VII.3- Caractérisation hydrochimique des eaux dans les aquifères des schistes métamorphiques et des grès de l'Ordovicien	36
VII.4- Caractérisation hydrochimique des eaux dans l'aquifère des calcaires du Carbonifère	37
VII.5- Caractérisation hydrochimique des eaux dans l'aquitard quartzitique de l'Ordovicien	38
VIII- EXPLOITATION DES AQUIFERES	39
IX- METHODOLOGIE DE LA REALISATION DE LA CARTE HYDROGEOLOGIQUE	42
IX.1- Acquisition des données	42
IX.1.1- Données géologiques	42
IX.1.2- Données météorologiques	42
IX.1.3- Données hydrogéologiques	42
IX.2- Banque de données hydrogéologiques	43
X- PRESENTATION DE LA CARTE HYDROGEOLOGIQUE	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	46
ANNEXES	48

INTRODUCTION

Les formations géologiques fissurées dans le plateau d'Oulmès peuvent constituer des aquifères d'une importance majeure. Les outils opérationnels pour gérer les ressources en eaux souterraines de ces milieux en termes d'exploitation, de protection ou de gestion prévisionnelle sont difficiles à élaborer. En effet, la structure complexe de ces réservoirs, essentiellement liée à leur histoire tectonique ne permet qu'une compréhension incomplète des différents processus hydrogéologiques.

En zones arides et semi-arides, la protection de ces aquifères tant en terme de quantité que de qualité est une nécessité. En effet, ils sont sujets à une exploitation intensive provoquée par la croissance des besoins en eau et d'autre part à de possibles dégradations dues aux pressions environnementales.

Cette carte hydrogéologique du plateau d'Oulmès réalisée par le Laboratoire d'Hydrogéologie du Département Géologie de l'ENIM et l'équipe d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement du Département GEOMAC de l'Ulg, constitue un outil essentiel pour la gestion tant quantitative que qualitative des ressources en eaux souterraines du plateau d'Oulmès. Elle présente une étape dans la mise en place de mesures de protection et d'une gestion efficace des eaux souterraines.

La figure 1 montre la limite de la zone cartographiée du plateau d'Oulmès ainsi que la géologie de la zone telle que tirée des cartes géologiques 1/50.000 d'Oulmès et de Tifoughaline.



Figure 1 : Carte géologique du plateau d'Oulmès montrant la limite de la zone cartographiée tirée à partir des cartes géologiques 1/50000 d'Oulmès et de Tifoughaline.

Le plateau d'Oulmès est situé dans sa totalité, dans la Méséta centrale, encore appelé plateau « Central Marocain » (Termier, 1936; Beaudet, 1969). Celui-ci se présente comme un vaste quadrilatère dont Rabat, Azrou, Kasba Tadla et Casablanca marquent les sommets. Il est limité au nord par le couloir Sud-Rifain, au sud par le plateau des phosphates, à l'est par le Moyen Atlas et à l'ouest par la Méséta côtière (Figure 2).



Figure 2 : Le massif hercynien central du Maroc (Saadi M. (1982), Carte structurale du Maroc au 1/4.000.000 des domaines Mésetien et Atlasique).

La Méséta centrale est drainée en grande partie par deux cours d'eaux principaux : le Beht (affluent rive gauche du Sebou) et le Bou-Regreg (Figure 3). Le plateau d'Oulmès fait partie du bassin versant de l'oued Bou-Regreg. Cet oued présente un bassin versant d'une superficie totale de 9700 km², soit près de 70% de la superficie totale de la Méséta centrale.

A quelques kilomètres au sud du Jbel Hamou-ou-Guerr, l'oued Bou-Regreg prend naissance à la suite de la confluence des oueds Boulahmayel et Ksiksou dont les bassins versants ont une superficie de 973 et 863 km² (Figure 3).



Figure 3 : Les principaux cours d'eau de la Méséta Centrale

La zone cartographiée s'étend d'est en ouest entre les méridiens 6°7' et 5°58' et du nord au sud entre les parallèles 33°27' et 33°20'. Elle a une superficie de 132 km^2 , ce qui représente 14% de la superficie totale du bassin de l'oued Boulahmayel. Cette zone d'étude est limitée au nord par l'oued Afçal (principal affluent rive droite d'oued Boulahmayel), au sud et à l'ouest par l'oued Boulahmayel et à l'est par l'oued Tajourrout et la ligne de crêtes qui forment la limite entre le plateau d'Oulmès et la région de Tifoughaline (S. Dadi, 1998).

II- CADRE GEOMORPHOLOGIQUE

Le plateau d'Oulmès se caractérise par un relief très accidenté. Les zones planes sont limitées au centre du plateau. Des points saillants constitués de roches dures (quartzites) et des vallées fortement encaissées, creusées dans des schistes primaires sont observés. Ces vallées constituent le lit de nombreuses petites rivières temporaires.

L'altitude est très variable. Les points culminants atteignent 1000 m environ à l'ouest de la zone et près de 1300 m au nord et à l'est. Le dénivelé entre les sommets et les fonds des vallées est assez important puisqu'il atteint plusieurs centaines de mètres. La cote minimale à laquelle coule l'oued Boulahmayel est de 600 m.

La zone cartographiée se subdivise en deux grandes unités différenciées par la nature des terrains et leur propre morphologie : le massif granitique occupe la partie centrale et occidentale de la zone d'étude et les étendues schisteuses et les barres quartzitiques occupent les terrains environnants (Figure 4). Le cadre géologique détaillé sera décrit dans le chapitre suivant.



Figure 4 : Les deux unités caractérisant la nature de la zone cartographiée

II-1 Massif granitique

Il est caractérisé par une surface peu drainée et subit une altération donnant une arène granitique rosâtre. Il se comporte comme un ensemble moins résistant à l'altération que les barres quartzitiques (Dadi, 1998).

Au sud et au nord, le massif est érodé respectivement par l'oued Boulahmayal et l'oued Afçal, tandis qu'à l'aval par l'oued Mou Attar.

II-2 Etendues schisteuses

Dans les étendues schisteuses, un fort ravinement est constaté. Ceci donne un ensemble de collines et de ravins, sièges d'écoulement des eaux de ruissellement en périodes pluvieuses.

Les principales vallées sont empruntées par l'oued Boulahmayal au sud et l'oued Afçal au nord. Ces vallées, profondes de 500 à 600 mètres environ, sont peu accessibles et peu fréquentées.

Surgissant au sein des étendues schisteuses, les barres quartzitiques s'alignent suivant une direction NNE-SSW et sont moins altérées. Ces niveaux quartzitiques dessinent d'une part, une ligne de crête à l'ouest de la zone d'étude et d'autre part, une ligne de crête à l'est, en forme de demi-ovale régulier, jalonnée par des hauts sommets d'altitude supérieure à 1200 m : Tizi-al-Kenz (1254 m) et Oulmès (1255 m).

III- CADRE GEOLOGIQUE

III.1- Contexte lithologique

L'évolution géologique du plateau d'Oulmès s'inscrit dans l'évolution générale du plateau central et de ses bordures.

Les formations géologiques affleurantes dans la zone d'étude sont constituées principalement par (Figure 5):

- une formation cristalline occupant le centre de la zone d'étude ;

- des formations cristallophylliennes occupant le reste du secteur d'étude.

A celles-ci s'ajoutent : des formations volcaniques, des formations superficielles (arène granitique et alluvions localisées sur les rives des oueds).



Figure 5 : Carte géologique du plateau d'Oulmès.

III.1.1 Formation cristalline

Il s'agit du granite d'Oulmès qui affleure au sein des schistes cambro-ordoviciens sur une trentaine de km^2 . Le massif granitique est de type essentiellement calco-alcalin (Diot et *al.*, 1987) et présente une diversité pétrographique:

- un granite à grain moyen à deux micas qui constitue le volume principal du massif ;
- un granite à grain fin à deux micas occupant le centre du massif;
- un granite aplitique* riche en micas et isolé du massif principal.

^{*} aplitique : structure très finement grenue.

Le granite d'Oulmès est considéré comme un granite syntectonique, il est mis en place le long d'une zone de cisaillement décrochante sénestre profonde du socle mésetien, subverticale et de direction générale N10 vers l'est (Boutaleb, 1988).

III.1.2- Formation volcanique

La zone d'étude comporte des vestiges de trois groupes de venues éruptives (Termier et *al.*, 1950):

- les néphélinites du volcan de Targou : il s'agit de deux coulées matérialisées par des lambeaux et dont les directions sont nord-ouest et sud-ouest. Le volcan est placé sur la crête qui sépare l'oued Afçal de l'oued Boulahmayel ;
- les phonolites : elles se présentent en une brève coulée sur la rive gauche de l'oued Mou Attar ;
- les murites : elles affleurent en forme de tables volcaniques dominant les oueds Boulahmayel et Tajannout.

III.1.3- Formations cristallophylliennes

Elles occupent plus de 60% de la superficie des affleurements du secteur d'étude. Ces formations sont essentiellement schisteuses, d'âge paléozoïque, et se répartissent de part et d'autre du granite d'Oulmès. Ainsi, en allant du granite vers la limite nord-est de la zone d'étude, on distingue de la plus ancienne à la plus récente les formations suivantes :

a- Formation cambro-ordovicienne

La majeure partie de la formation cambro-ordovicienne se trouve dans l'auréole du granite, elle appartient au membre de Tergou et atteint environ 1700 m de puissance (Termier et *al.*,1950).

b- Formations ordoviciennes

Les terrains ordoviciens constituent la plus grande superficie des affleurements du secteur d'étude. La puissance de la formation est estimée à environ 1415 m (Tahiri, 1991). Elle se présente comme suit :

- Membre de Tizi-el-Kenz (situé à 2 km au sud d'Oulmès), d'âge Llanvirn-Llandeilo. Il débute par des argilites grisâtres panachées micacées d'une puissance d'environ 300 à 500 m, puis des quartzites beige clair à bruns massifs en bancs d'une épaisseur d'environ 15 m. Au sommet, on rencontre une alternance de quartzarénites micacées et d'argilites grises micacées (8 m) ;
- Membre de Tleta (Souk d'Oulmès), d'âge Llandeilo-Caradoc, constitué surtout par des pélites micacées d'une épaisseur d'environ 450 à 500 m. A mi-épaisseur de ce membre se trouvent des lentilles conglomératiques (50 m d'épaisseur) ;
- Membre de Bou-Tamrirt (situé à 3 km au nord d'Oulmès), d'âge Caradoc-Ashgill et d'une puissance d'environ 390 m. En bas, on trouve des quartzites beiges massifs suivis des argilites gris verdâtre micacées qui deviennent sombres gréseuses et microconglomératiques. Le membre se termine par des arénites gris mauve et des argilites sombres qui alternent avec des niveaux arénitiques ou grauwackeux fins.

c- Formation silurienne

Elle se présente en forme d'une bande allongée nord-sud. Elle est formée essentiellement d'argilites grise sombre à graptolites avec des niveaux quartzitiques qui forment une bande en rive droite de l'oued Tiddar. L'épaisseur de la formation est estimée à environ 35 m. Elle date du Télychien supérieur (Tahiri, 1991).

d- Formation dévonienne

Elle affleure à l'extrême nord-est du bassin et représente le Dévonien inférieur. La formation fait partie de la coupe de Ain Dram (situé à l'extérieur du bassin au nord-ouest d'Oulmès) et est constituée par des alternances de pélites et grauwackes, des pélites gris vert, et des alternances de calcaires et de pélites à nodules calcaires. La puissance est estimée à

400 m (Tahiri, 1991).

e- Formation Carbonifère

La formation viséenne affleure au niveau du Jbel Tougouroulmès (à 1 km au nord-est d'Oulmès). Elle est formée par des calcaires gréseux conglomératiques du Viséen supérieur (Tahiri, 1991).

III.1.4- Formations superficielles

Les formations superficielles du bassin sont de textures variées et d'origines diverses. Elles se sont accumulées essentiellement au Quaternaire et n'occupent que peu d'espace. Elles comportent les alluvions anciennes, les dépôts lacustres, les alluvions récentes et les éluvions et arènes (Termier et *al.*,1950).

a- Alluvions anciennes

Elles forment des terrases à la confluence de Tajarrout par des galets atteignant 70 cm de longueur, de quartz, quartzites, granites, cornéennes, et autres roches métamorphiques. Dans la vallée de l'oued Attar (affluent rive gauche de l'oued Afçal), les terrasses alluviales sont constituées par des alluvions épaisses de 2 à 3 mètres.

b- Dépôts lacustres

Ils affleurent près de la limite sud-est du secteur d'étude, sur la rive droite de l'oued Tiddar (affluant rive de l'oued Tajarrout). Ils ont une puissance atteignant 15 à 20 mètres et sont constitués par une alternance de cailloutis (fragments de schistes, quartzites, ...) et d'argiles.

c-Alluvions récentes

Les alluvions récentes ne couvrent que de très faibles surfaces dans la vallée de l'oued Boulahmayel. Elles sont constituées par des matériaux dont la taille varie des sables et graviers jusqu'aux blocs de plusieurs mètres cubes.

d- Eluvions et arènes

Ces formations sont liées à l'altération du massif granitique. Elles occupent une grande partie de la surface affleurante du granite et sont souvent minéralisées. Leur puissance est très variable mais reste faible avec une moyenne de 0.6 m.

III.2- Contexte tectono-métamorphique

La région a enregistré à la fois les mouvements tectoniques de la phase anté-viséenne et de la phase hercynienne majeure (Figure 6).

III.2.1- Phase anté-viséenne supérieure

Cette phase s'est exprimée par une tectonique distensive en blocs basculés avec des cisaillements ductiles. A la base du versant sud du Jbel Tougouroulmès qui se trouve à l'extrémité nord-est de la zone cartographiée, existe une discordance entre les terrains du Dévonien inférieur et ceux du Viséen supérieur. Ceci s'explique par les dépôts des terrains viséens sur un bloc préalablement basculé et assez redressé. La direction différente des plis rencontrés (N120 et N25) est due, par contre, à des cisaillements dans le plan axial au cours d'une même phase post-viséenne (Tahiri, 1991).

III.2.2- Phase majeure hercynienne

Dans le secteur d'étude, deux épisodes de plissement sont présents et sont associés à des cisaillements NE-SW (Tahiri, 1991):

- les plis P1 : ce sont des plis centimétriques à plurimétriques, de directions axiales N0 à N50 et associés à une schistosité S1 ;
- les plis P2 : il s'agit de plis centimétriques à décimétriques, de direction axiale N30 et associés à une schistosité S2 ;
- les diaclases : elles sont de direction générale N120 et reprennent les structures précédentes.

La phase majeure est aussi marquée par l'emplacement d'une zone de cisaillement. Il s'agit de la faille d'Oulmès qui est synchrone aux plis P1 (Termier, 1936).

III.2.3- Déformation métamorphique

La répartition de la déformation et celle du métamorphisme autour du massif granitique d'Oulmès a été synthétisée par Tahiri (1991). En effet :

- le degré du métamorphisme croît en se dirigeant vers le massif granitique ;
- plus on s'approche du granite, plus l'intensité de la déformation et du métamorphisme est importante : les plis se referment, le microplissement s'accentue et le débit schisteux devient plus important.

L'organisation structurale de la région, considérée comme une des plus complexes du Maroc, peut se résumer comme suit (Figure 6) :

- une phase de plis et chevauchements à vergence NW à W, au Westphalien inférieur, sans doute à l'origine d'une émersion régionale ;
- une phase de détachement tectonique conduisant à la délamination des formations ;
- une phase de plis et chevauchements à vergence SE, au Stéphanien ;
- la mise en place du massif granitique d'Oulmès et de son cortège filonien minéralisé, au Stéphano-Permien. C'est peut-être au cours de cet événement que sont apparus les premières failles normales et décrochantes majeures, dont celle de Smaala-Oulmès ;

• l'apparition de failles normales et décrochements tardifs et le rejeu des accidents antérieurs, injectés par des dolérites (s.l.) qui pourraient dater du Permien ou marquer le début de l'ouverture atlantique, au Trias-Lias inférieur.



Figure 6: Schéma conceptuel de contact tectonique soustractif (faille de détachement) (Baudin T., et *al.*, Carte géologique du Maroc au 1/50.000 feuille d'Oulmès. *Notes et mém serv. géol.* n°410 bis).



Figure 7: Carte des linéaments



Figure 8: Rose d'orientation

IV.1- Hydrologie

Selon une étude des eaux superficielles du plateau d'Oulmès faite sur la période 1977-1995 (Dadi, 1998) et d'après la comparaison des courbes de débits et de pluie, le régime hydrologique peut être subdivisé en deux périodes :

- une période de hautes-eaux qui se place en saison froide et pluvieuse. Elle s'étend de janvier à avril, avec un maximum de précipitations au mois de février ;

- une période de basses-eaux qui s'étend sur toute la saison chaude et sèche et même sur une partie de la saison froide (mai à décembre), avec un minimum de pluie en juillet, août et septembre.

En se référant à la même étude, l'abondance annuelle des débits spécifiques des cours d'eau dans le secteur d'étude est relativement élevée (2.6 l/s/km²), ce qui reflète parfaitement l'importance des précipitations annuelles sur le secteur d'étude ainsi que le rôle de la forme et le relief du bassin.

IV.2- Caractéristiques des bassins versants

Tous les écoulements de surface prennent naissance à l'intérieur de la zone d'étude et convergent vers deux cours d'eau principaux : l'oued Afçal et l'oued Boulahmayel. Ainsi, la totalité de la surface topographique peut être scindée en deux grands bassins versants. Ceux-ci sont limités par une ligne de partage des eaux superficielles orientée NNE-SSW.



Une délimitation des sous-bassins a été proposée par Dadi, 1998 (Figure 9).

Figure 9 : Délimitation des sous-bassins versants (d'après Dadi, 1998)

Le bassin versant de l'oued Afçal comporte trois sous-bassins :

- le sous-bassin de l'oued Afçal en amont de la confluence de l'oued Mouattar : A1 ;
- le sous-bassin de l'oued Mouattar : A2 ;
- le sous-bassin résiduel de l'oued Afçal : A3.

Le bassin versant de l'oued Boulahmayal comporte six sous bassins :

- le sous-bassin de l'oued Tiddar-Tajounnout : B1 ;
- le sous-bassin de l'oued Boulahlmayel en amont de la confluence de l'oued Moughanime : B2 ;
- le sous-bassin de l'oued Moughanime : B3 ;
- le sous-bassin de l'oued Boulahmayel en amont de la confluence de l'oued Tlat Narset : B4 ;
- le sous-bassin de l'oued Tlat Narset : B5 ;
- le sous-bassin résiduel de l'oued Boulahmayel.

Les caractéristiques des sous bassins sont données dans le tableau 1.

				Rectangle	Rectangle équivalent		
		Surface (km ²)	Périmètre (km)	Longueur (km)	Largeur (Km)	de Gravelius (Kc)	
Sous-bassins	A1	35,63	37,48	16,6	2,15	1,77	
versants de	A2	16,08	21,79	9,13	1,76	1,53	
l'oued Afçal	A3	5,08	15,5	7,03	0,72	1,94	
	B1	18,22	29,41	13,34	1,37	1,94	
Sous-bassins	B2	6,54	11,38	4,09	1,6	1,26	
versants de	B3	11,16	14,4	4,9	2,25	1,22	
l'oued	B4	6,9	12,73	4,98	1,39	1,37	
Boulahmayel	B5	17,34	24,79	10,78	1,61	1,68	
-	B6	15,84	28,79	13,19	1,2	2,04	

 Tableau 1: Caractéristiques de la disposition dans le plan des sous-bassins versants du secteur d'étude (Dadi, 1998)

Le coefficient de Gravelius est défini comme étant le rapport du périmètre du bassin versant au périmètre du cercle ayant la même surface. Il s'agit d'un indicateur de forme géométrique du bassin. Plus ce coefficient est faible, plus la forme du bassin est compacte.

$$K_{G} = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

K_G est l'indice de compacité de Gravelius,

A : surface du bassin versant [km²],

P : périmètre du bassin [km].

2005

Selon Dadi (1998), la zone cartographiée se caractérise par :

- une forme très ramassée (l'indice de Gravelius moyen est de 1,6), ce qui implique souvent une circulation rapide des eaux jusqu'à l'exutoire ;
- le bassin versant drainé par l'oued Afçal présente une forme moins ramassée que l'oued Boulahmayel.
- le bassin le plus compact du plateau d'Oulmès est le bassin versant de l'oued Moughanime (B3) avec un indice de Gravelius de 1,22.

Le chevelu hydrographique est un réseau de branches relativement longues et rectilignes, de densité forte aux limites du secteur et faible au centre. Elles sont organisées suivant deux directions principales : N10 et N120. Ces directions montrent bien le rapport des directions de la fracturation à celles du réseau hydrographique.

IV.3- Estimation du bilan hydrologique

L'établissement d'un bilan hydrologique a pour but de comptabiliser les apports et les pertes en eau d'un bassin versant. Il permet d'estimer la part des précipitations contribuant à l'écoulement superficiel et à l'alimentation des nappes souterraines. Son calcul repose sur les données concernant les éléments hydrologiques principaux à savoir : la pluviosité, le ruissellement, l'infiltration et l'évapotranspiration. Pour un bassin, ou sous-bassin, on peut écrire :

$$P = ETR + Q_{ex} + Q_{cap} + \Delta R$$

dans laquelle

P= précipitations ETR= évapotranspiration Q_{ex} = débit à l'exutoire Q_{cap} = débit capté ΔR = variation de la réserve en eaux souterraines pour la période considérée.

Le calcul du bilan hydrologique dans le plateau d'Oulmès a été établi selon la méthode des bilans de THORNTHWAITE (Dadi, 1998). L'évapotranspiration réelle avait été estimée à 318.9 mm/an, l'infiltration à 381.9 mm/an, les précipitations moyennes annuelles étaient de 700 mm (1972-1994).

Depuis, une autre étude (Elbatloussi et Laziri, 2004) a été réalisée et a permis de simuler par le sous-modèle hydrologique d'EPIC-MAILLE (Erosion Productivity Impact Calculator) les différents termes de l'équation du bilan hydrologique.

La simulation de ces processus a été réalisée en distinguant cinq unités. Elles (Figure 10) ont été déterminées via la combinaison des données géologiques, pédologiques et des occupations du sol (Tableau 2). La géologie de la zone cartographiée était le critère prépondérant de ce regroupement.

Le modèle n'a pas pu être validé vu l'absence de débits mesurés aux exutoires des bassins sur plusieurs années à comparer avec les écoulements simulés par le modèle EPIC-MAILLE.

Unités	Sol sur substrat	Occupation du sol
	Schisteux	Arboriculture
	Schisteux	Céréaliculture
1	Schisteux	Céréaliculture
	Schisteux	Forêt
	Quartzitique/Schisteux	Arboriculture
2	Schisteux	Céréaliculture
2	Schisteux	Céréaliculture
	Schisteux	Forêt
3	Quartzitique	Jachère
3	Schisteux	Forêt
4	Schisteux calcaire	Céréaliculture
4	Schisteux	Forêt
	Granitique	Lavande
5	Granitique	Céréaliculture
	Schisteux	Forêt

Tableau 2: Présentation des cinq unités homogènes avec leur nature et leur occupation du sol.



Figure 10 : Les différentes unités "homogènes" du plateau d'Oulmès.

V- CADRE HYDROGEOLOGIQUE

V.1- Unités hydrogéologiques

La zone cartographiée présente une diversité lithologique importante, ceci rend l'analyse hydrogéologique complexe.

Un regroupement des unités lithologiques en unités hydrogéologiques présentant les mêmes caractéristiques au regard de leur comportement hydrogéologique a été réalisé.

En effet, on peut catégoriser globalement les couches (Unesco-OMM, 1992) en termes d':

- aquifère: formation perméable contenant de l'eau en quantités exploitables;
- **aquitard**: formation semi-perméable permettant le transit de flux à très faible vitesse et rendant la couche sous-jacente semi-captive;
- aquiclude: couche ou massif de roches saturées de très faible conductivité hydraulique.

V.1.1- Critères de regroupement

Les différents faciès ont été regroupés en unités hydrogéologiques, c'est-à-dire en entités présentant des propriétés hydrogéologiques similaires.

Parmi ces propriétés on peut citer :

- la porosité et plus spécialement la porosité efficace des roches qui détermine leur capacité d'emmagasinement en conditions de nappe libre ;
- la perméabilité (conductivité hydraulique) des roches qui détermine leur capacité à conduire les eaux souterraines ;
- le type de porosité : porosité de pores ou porosité de fissures.

V.1.2- Unités hydrogéologiques

Dans la région cartographiée, douze unités hydrogéologiques ont été identifiées. Le tableau lithostratigraphique (Tableau 3) reprend les formations géologiques rencontrées dans le plateau d'Oulmès et montre leur correspondance avec les unités hydrogéologiques.

a- Aquifère des arènes granitiques

Suite à l'altération et la désagrégation du granite, les minéraux produits (quartz et muscovite) forment une formation sableuse et contribuent donc à l'augmentation de la porosité et de la perméabilité.

Il s'agit donc d'une formation poreuse et perméable présentant un réseau de pores interconnectés. D'après la littérature, la porosité efficace de l'arène granitique serait comprise entre 10 et 20%, sa conductivité hydraulique pourrait être en moyenne comprise entre 10^{-4} et 10^{-3} m/s.

Ere	Système	Epoque	Etage	Lithologie Formation		Abréviation	Comportement hydrogéologique
UE				Alluvions		A, q1, q2-4, qE, qe	Aquifère alluviale
lQI	Quaternaire Plio-			Néphélinite		qn	Aquifère des
DZ(quaternaire		Téphrite		pqv	roches volcaniques
CEN	Paléogène Eocène			Arène granitique indifférenciée d'Oulmès		eAy	Aquifère des arènes granitiques
	Permien						Aquifàra
			Stéphanien à Autunien	Granite à grain moyen		hS§	granitique du Stéphanien
	Carbonifère	Mississipien	Viséen supérieur	Barre de grès, quartzites ou grauwackes	Ait al Haj	hV3	Aquitard
			Viséen supérieur à moyen	Calcaires gréseux à alteranance de schistes et grès	Sidi Abbou	hV2-3	Aquifère des calcaires du Carbonifère
	Dévonien			Schistes vert sombre homogènes à rares bancs et nodules gréseux ou carbonatés	Ain Dram	s8-d3	Aquifère schisto-gréseux
E			Lochkovien	Schistes noirs avec de bancs de grès et de bancs carbonatés	Sidi M'Bellej	s3-d1	du Dévonien
DIOZO			Ashgill inférieur à supérieur	Schistes grèseux microconglomératiques	Ould Akra	огба	Aquifère schisto-gréseux
PALE			Caradoc supérieur	Alternance de grès quartzites et de pélites	Sidi Said	or5e	de l'Ordovicien
	ien	Ordovicien supérieur	Caradoc moyen	Barre massive de quartzite à rares interbancs argilo-silteux localisés à la base et au sommet de la formation.	Baddouz	or5c	Aquitard
	Ordovic		Caradoc inférieur à moyen	Alternance de couches silteuses et de grès quartzite	Grou	or5b	Aquifère silteux et gréseux de l'Ordovicien
			Llandeilo supérieur à Caradoc inférieur	Barre décamétrique massive de quartzite à structure homogène.	Ain Malou	or4c-5a	Aquitard
		Ordovicien inférieur		Pélites silteuses homogènes gris-clair à noires et à micas blancs	Ouljet Bou Khemis	or4b	Aquifère des schistes métamorphiques
			Llanvirn supérieur	Alternance de schistes et de niveaux de grès	El Harcha	or3b-4a	et des grès de l'Ordovicien

Tableau 3 : Tableau litho-stratigraphique (Géologie-Hydrogéologie).

b- Aquifère granitique du Stéphanien

L'aquifère granitique du Stéphanien présente probablement des pores relativement réduits et une faible connexion entre eux. La porosité primaire serait donc très faible comme la perméabilité.

Dans la région d'Oulmès, le granite est considéré comme un granite syntectonique qui s'est mis en place le long d'une zone de cisaillement profonde du socle mésétien. Cette fracturation a permis à la roche d'acquérir un certain potentiel hydrogéologique.

On estime donc la porosité efficace du granite de l'ordre de 5% et sa conductivité hydraulique comprise entre 10^{-7} et 10^{-5} m/s.

c- Aquifère des roches volcaniques

Cette unité regroupe les néphélinites et les téphrites qui représentent une surface mineure dans le secteur étudié.

Ces matériaux volcaniques présentent une grande porosité. En effet, cette porosité résulte, d'une part des bulles de gaz piégées dans la roche et, d'autre part de la fissuration du matériau résultant de son refroidissement rapide. La porosité vacuolaire ne constitue pas une porosité hydrauliquement active. Par contre, la fissuration de la roche, lors de son refroidissement, a engendré une porosité ouverte.

Ainsi, la porosité efficace atteindrait 20% et la conductivité hydraulique serait de l'ordre de 10^{-4} m/s.

d-Aquifère des calcaires du Carbonifère

C'est une formation de calcaires gréseux de faible étendue dans la zone cartographiée. Le calcaire est présent sous forme de bancs sédimentaires.

La formation de ces bancs provient de la précipitation de minéraux carbonatés dans les interstices du matériau. Elle entraîne une fermeture de la porosité d'interstice et un abaissement important de sa perméabilité.

La fracturation et la dissolution du calcaire leur offre une porosité secondaire importante.

La porosité efficace du calcaire pourrait varier de 5 à 15%, sa conductivité hydraulique entre 10^{-4} et 10^{-3} m/s.

e- Aquifère des alluvions

L'aquifère des alluvions comprend les formations superficielles du Quaternaire (alluvions et éluvions).

Ces dépôts alluviaux sont grossiers et présentent une excellente porosité totale. La taille de ces sédiments leur offre une conductivité hydraulique élevée.

Les éléments qui constituent ces formations sont hétérométriques, il est donc difficile d'estimer correctement la porosité efficace.

f- Aquitard quartzitique du Carbonifère, Aquitards quartzitiques de l'Ordovicien

Ces différents aquitards n'occupent pas la même zone et ils ont des âges différents. Ils ont été regroupés car ils présentent globalement les mêmes caractéristiques hydrogéologiques.

Le quartzite est une roche sédimentaire consolidée. Elle présente des perméabilité et porosité très faibles.

La présence du quartz la rend difficilement altérable, ce qui implique une conductivité hydraulique moyenne faible comprise entre 10^{-8} et 10^{-6} m/s. Sa porosité efficace est égale à 2%.

L'aquitard quartzitique de l'Ordovicien est caractérisé aussi par la présence d'interbancs argilo-silteux localisés à la base et au sommet de la formation. L'argile est une roche poreuse mais très peu perméable, le diamètre de ses pores est tellement petit que la circulation d'eau y est quasiment nulle.

La porosité efficace d'une argile est souvent inférieure à 1%.

g- Aquifère schisto-gréseux du Dévonien, Aquifère schisto-gréseux de l'Ordovicien et Aquifère des schistes métamorphiques de grès de l'Ordovicien

La zone occupée par ces aquifères et leurs âges sont différents. Ils ont été regroupés vu qu'ils possèdent des caractéristiques hydrogéologiques très similaires.

Dans le cas des schistes, le métamorphisme a entraîné une amélioration de la porosité et de la perméabilité des matériaux argileux initiaux par la mise en place d'une porosité de fissures permettant la circulation de l'eau.

Dans le plateau d'Oulmès, ces schistes sont généralement fracturés, ce qui leur confère des propriétés hydrogéologiques intéressantes.

La porosité efficace des schistes avec alternance de grès ou des bancs carbonatés serait estimée de 5 à 10%, les conductivités hydrauliques de l'ordre de 10^{-6} m/s.

V.2- Données piézométriques

V.2.1- Cartes piézométriques

Dans la zone cartographiée, des mesures piézométriques ont été effectuées à des périodes différentes : octobre-novembre 1982, décembre 2002, juillet 2003 et mars 2004. Ces données ont été interprétées en prenant en considération le comportement des unités hydrogéologiques, les données structurales, les formes géomorphologiques ainsi que la délimitation des sous-bassins hydrologiques de la région. L'analyse des zones où une ébauche de carte piézométrique peut être tracée a montré que la direction moyenne de l'écoulement est soit orientée vers le nord-est, soit vers le sud-ouest.

Les isopièzes dessinés sur la carte hydrogéologique principale ont été tracés sur base des mesures réalisées, pour une période de hautes-eaux, durant le mois de **décembre 2002**, vu la disponibilité des données pour cette période.

Le sous-bassin A1 contient 48% des niveaux piézométriques mesurés, la surface couverte est constituée essentiellement par des schistes fracturés avec quelques barres quartzitiques de moindre importance.

Les données existantes ne permettent pas un tracé piézométrique complet couvrant le sous-bassin A1, néanmoins les courbes isopièzes tracées indiquent deux directions d'écoulement orientées globalement vers le nord-est et le nord-ouest.

La piézométrie passe d'un niveau de 1180 m au sud-est de la zone d'étude à une cote de 1100 m près de l'oued Afçal.

Dans les sous-bassins A2 et B5 sont inventoriés environ 40% des puits. Les puits du sous-bassin A2 se trouvent généralement soit au droit des granites fracturés, soit sur leur produit d'altération. Le sous-bassin B5 est formé dans sa majeure partie par des schistes avec quelques barres quartzitiques à son extrême limite orientale.

A partir de la ligne de partage superficielle formée par les quartzites (Tizi al Kenz dans le sous-bassin B5), la direction générale d'écoulement (basée sur un nombre limité de données) est généralement E-W.

A partir du sommet (1169 m) qui se trouve à la limite supérieure du sous-bassin A2, les courbes piézomètriques indiquent une direction générale de l'écoulement orientée NE-SW.

Les eaux des sous-bassins A2 et B5 se rejoignent pour se déverser dans l'oued Boulahmayel.

Le sous-bassin B3 contient très peu de données, il est donc difficile de tracer une carte piézométrique.

V.2.2- Fluctuations piézométriques en fonction du temps

Les niveaux piézomètriques fournis par le gestionnaire de la ferme de BENSALEH ont permis d'étudier les variations temporelles du niveau d'eau. Les puits sont répartis sur une petite superficie et se localisent dans les deux sous-bassins B3 et B5 (Figure 11).



Figure 11: Localisation des puits de la ferme de Bensaleh.

Nous ne disposons pas de connaissances exhaustives sur les débits effectivement pompés.

Une évolution saisonnière de la réserve d'eau souterraine est à noter. Cette évolution est marquée par une phase de remontée des niveaux statiques des ouvrages au cours de la saison des pluies (novembre-avril) suivie d'une importante baisse au cours de la saison sèche (à partir du mois de mai), cette baisse est probablement due principalement aux pompages durant cette période.

Dans la période de hautes-eaux, la valeur de la profondeur minimale enregistrée est de 2 m dans le puits B26 fin janvier 2004. Cette profondeur peut atteindre, durant la période de basses eaux, une valeur maximale de 55.5 m remarquée au puits 2 en fin novembre 2002.







Figure 12: Variations de la profondeur d'eau des puits de Bensaleh en fonction du temps

VI- PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Dans le plateau d'Oulmès, plusieurs essais de pompage ont été réalisés, principalement au cours de deux campagnes en 1982 et 2003 (Figure 13).



Figure 13: Localisation des puits et forages de pompages d'essais

VI.1- Essais réalisés en 1982

En 1982, la Direction Provinciale de l'Agriculture de Khémisset avait réalisé plusieurs forages de reconnaissance et des essais hydrogéologiques dans la partie NE du plateau, dans le but de créer un système d'irrigation collectif dans les périmètres d'arbres fruitiers. Les essais à l'air lift ont été effectués dans les forages 728/21, 733/21, 737/21 et 739/21, alors que des pompages d'essais ont été exécutés sur les forages 720/21, 722/21 et 728/21 (Figure 13).

L'analyse et l'interprétation de ces essais ont été faites par la méthode de Cooper-Jacob. Nous présentons ci-dessous les résultats obtenus.

- Prof : profondeur totale de l'ouvrage ;
- D : diamètre du puits ;
- NP : niveau piézométrique ;
- Q : débits pompé ;
- tps : durée de pompage ;
- Td : transmissivité en descente ;
- Tr : transmissivité en remontée ;
- Kd : conductivité hydraulique en descente ;
- Kr : conductivité hydraulique en remontée ;
- S : coefficient d'emmagasinement.

VI.1.1- Essais à l'air lift

a- Caractéristiques des essais

Plusieurs essais à l'air lift ont été réalisés pour les forages 728/21, 733/21, 737/21 et 739/21. Le programme des essais est repris dans le tableau 4.

Forage	Prof	NP/Sol initial	Débit d'air lift	Durée	NP/Sol final
8-	(m)	(m)	(l/s)		(m)
728/21	70	4.10	14.7	5h45mn	16.70
733/21	70	2.40	6.25	5h	30.24
737/21	64	2.75	13.5	7h15mn	21.72
739/21	40	4.32	16.5	5h15mn	9.74

Tableau 4: Programme des essais à l'air lift

b- Synthèse des résultats

Le tableau 5 reprend les valeurs de transmissivité et de conductivité hydraulique obtenues à partir des données mesurées au cours de la remontée.

Forage	Tr (m²/s)	Kr (m/s)
728/21	$2.5 \ 10^{-4}$	3 - 6 10 ⁻⁶
733/21	3 10 ⁻⁴	4 10 ⁻⁶
737/21	$3.2 \ 10^{-4}$	0.5 - 1.4 10 ⁻⁵
739/21	1.4 10 ⁻³	$0.3 - 3.5 \ 10^{-5}$

Tableau 5: Valeurs de transmissivité et de conductivité hydraulique en remontée.

VI.1.2- Essais de pompage

a- Caractéristiques de l'essai

Plusieurs essais de pompage à différents débits ont été effectués sur les ouvrages 720/21, 722/21 et 728/21.

Les essais ont comporté les phases suivantes :

- pompage réalisé à un débit donné pendant une durée déterminée ;
- mesure de rabattement dans le puits de pompage et dans les piézomètres de contrôle au cours du pompage ;
- mesure de la remontée du niveau d'eau dans le puits de pompage et piézomètres après l'arrêt du pompage.

Puits de	Piézomètre de	$Q(m^3/s)$	tps
pompage	controle		1
720/21	732/21 744/21	8.71 10 ⁻³	27 h 45 mn
/20/21	755/21, 744/21	10.63 10 ⁻³	1 h
722/31	745/21, 746/21	1.79 10 ⁻³	?
		10 10 ⁻³	24 h
728/21	747/21, 748/21	20 10 ⁻³	6 h 45 mn
		17.7 10 ⁻³	20 h

Les programmes de ces essais de pompage sont repris dans le tableau 6.

Tableau 6: Programme des essais de pompage sur les ouvrages 720/21, 722/21 et 728/21.

b- Synthèse des résultats

Le tableau 7 reprend les valeurs de transmissivité en pompage et en remontée et de coefficient d'emmagasinement obtenues lors des différents essais de pompage.

Sur les courbes tracées, rabattement en fonction du temps, deux pentes ont été déterminées pour l'essai de pompage effectué sur l'ouvrage 720/21 et trois pour l'essai effectué sur l'ouvrage 728/21, d'où plusieurs valeurs de transmissivité (T, T', T'' ...).

Forage	Td (m²/s)	Td' (m²/s)	Tr (m²/s)	Tr' (m²/s)	S
720/21	9.9 10 ⁻⁴	3.7 10 ⁻⁴	1.06 10 ⁻³	2.45 10 ⁻³	-
733/21	-	-	-	-	-
744/21	6.7 10 ⁻⁴	3.4 10 ⁻⁴	$1.06 \ 10^{-3}$	$2.28 \ 10^{-3}$	1.2 10 ⁻⁴

Forage	Tr (m²/s)
722/21	1.63 10 ⁻³
745/21	$1.06 \ 10^{-3}$
746/21	-

Forage	Td (m²/s)	Td' (m²/s)	Td'' (m²/s)	Tr (m²/s)	Tr' (m²/s)	Tr'' (m²/s)	S
728/21	9.2 10 ⁻⁴	4.4 10 ⁻⁴	3.1 10 ⁻⁴	3 10 ⁻⁴	4.510 ⁻⁴	6 10 ⁻⁴	-
747/21	1.3 10 ⁻³	4.9 10 ⁻⁴	4.1 10 ⁻⁴	3 10 ⁻⁴	5 10 ⁻⁴	10-3	3.9 10 ⁻⁴
748/21	$1.7 \ 10^{-3}$	$4.8 \ 10^{-4}$	4.1 10 ⁻⁴	2.9 10 ⁻⁴	4.9 10 ⁻⁴	1.310 ⁻³	5.4 10 ⁻⁵

Tableau 7: Valeurs de transmissivité en pompage et en remontée et de coefficient d'emmagasinement

Forage	Conductivité hydraulique
	K(m/s)
720/21	$1 \ 10^{-5} - 4 \ 10^{-5}$
722/21	$2.1 \ 10^{-5} - 4.3 \ 10^{-5}$
728/21	$4 \ 10^{-6} - 4 \ 10^{-5}$

Le tableau ci-dessous reprend les intervalles de la conductivité hydraulique estimés à partir de l'interprétation des essais par la méthode de Cooper-Jacob.

Tableau 8 : Intervalles proposés de la conductivité hydraulique pour les forages 720/21, 722/21 et 728/21

VI.2- Essais de pompage réalisés en juillet 2003

a- Caractéristiques de l'essai

Des essais de courte durée ont été effectués sur le plateau d'Oulmès les 10 et 11 juillet 2003, au niveau de puits de large diamètre : A15, A9, P25 et B1 (Figure 13).

Puits	D (m)	Prof (m)	NP/sol initial (m)	Q(m3/s)	tps	NP/Sol final (m)
A15	1.75	31.35	6.49	15 10 ⁻³	2h33mn	3.36
A9	1.70	32.05	8.23	10 10 ⁻³	3h30mn	6.13
P25	1.55	35.5	19.89	$10 \ 10^{-3}$	1h07mn	13.94
B1	1.66	56.4	36.31	10 10 ⁻³	2h25mn	22.85

Le tableau suivant reprend le programme des essais

Tableau 9: Programme des essais de pompage pour les puits A15, A9, P25 et B1.

b- Synthèse des résultats

Une première interprétation des données de ces essais a été effectuée par la méthode de Cooper-Jacob. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant.

Puits	Td (m ² /s)	Kd (m/s)	Tr (m²/s)	Kr (m/s)
A15	1.44 10 ⁻³	5.8 10 ⁻⁵	1.12 10 ⁻³	4.5 10 ⁻⁵
A9	1.42 10 ⁻³	6 10 ⁻⁵	6.31 10 ⁻³	$2.65 \ 10^{-4}$
P25	4.1 10 ⁻⁴	2.63 10 ⁻⁵	-	-
B1	4.8 10 ⁻⁵	2.39 10 ⁻⁶	7.32 10 ⁻³	3.64 10 ⁻⁴

Tableau 10: Valeurs de transmissivité et de conductivité hydraulique en rabattement et en
remontée pour les puits A15, A9, P25 et B1.

Puits	Conductivité hydraulique K(m/s)
A15	$4.5 \ 10^{-5}$ - $5.8 \ 10^{-5}$
A9	$6\ 10^{-5}$ - 2.65 10^{-4}
P25	$2.63 \ 10^{-5} - 4.1 \ 10^{-4}$
B1	$2.39\ 10^{-6}$ - $3.64\ 10^{-4}$

L'interprétation de ces essais par la méthode de Cooper-Jacob a permis de proposer les intervalles suivants de conductivité hydraulique.

Tableau 11: Intervalles proposés de la conductivité hydraulique pour les puits A15, A9, P25 et B1.

Les conductivités hydrauliques obtenues par la méthode de Moench pour les puits A15 et A9 sont représentées ci-dessous :

Puits	Conductivité hydraulique K(m/s)
A15	$2.57 \ 10^{-5}$
A9	1.04 10 ⁻⁴

Tableau 12: Valeurs de la conductivité hydraulique obtenues par la méthode de Moench

La solution de Moench pour l'écoulement en milieu fracturé, bien que développée pour des nappes captives, présente l'avantage de tenir compte de l'anisotropie de l'aquifère et suppose que l'eau entre dans le puits uniquement à travers les fissures.

Le dépouillement et l'analyse automatiques des données ont été effectués à l'aide du logiciel AquiferTest v3.5.

Les résultats obtenus par cette méthode sont relativement semblables à ceux obtenus par la méthode de Cooper-Jacob.

Dans le cadre de ce projet, deux campagnes de mesures hydrochimiques ont été effectuées :

- une première campagne réalisée en décembre 2002 ;
- une seconde campagne effectuée en juillet 2003.

Les analyses chimiques des eaux des puits ont été réalisées au sein du laboratoire de chimie minérale du Département GEOMAC de l'Université de Liège et du laboratoire du Département de Géologie de l'ENIM.

VII.1- Définition de faciès

Le faciès chimique des eaux souterraines du plateau d'Oulmès a été déterminé lors d'études hydrochimiques menées sur le plateau d'Oulmès (Dadi, 98 et Chedadi, 04).

Les diagrammes de Piper et de Stiff ont été utilisés pour représenter les faciès hydrochimiques des eaux souterraines de la région.

Le diagramme de Piper est un système de diagrammes ternaires. Il est composé de deux triangles représentant la répartition des anions (Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻ et HCO₃⁻) et celle des cations (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et K⁺) et d'un losange représentant la répartition synthétique des ions majeurs.

La projection des points des eaux analysées sur la diagramme de Piper (Figure 14) a mis en évidence la présence de trois faciès chimiques des eaux :

- les analyses des eaux représentant des puits sur le granite et son arène montrent principalement un faciès mixte avec une faible minéralisation en magnésium.
- les échantillons représentant des eaux des puits sur les schistes à lentilles de calcaires ont généralement un faciès bicarbonaté, magnésien et calcique. La dissolution des roches permet leur enrichissement par les minéraux précités ;
- les eaux des puits qui se trouvent sur les schistes et les grès représentent plutôt un faciès mixte avec une tendance calcique apparente.



Figure 14 : Diagramme de Piper (campagne décembre 2002).

Le diagramme de Stiff est tracé sur base de quatre axes horizontaux portant les cations à gauche et les anions à droite et dont les concentrations sont exprimées en méq/l.

Les cations sont le sodium et le potassium regroupés (Na⁺+K⁺), le calcium (Ca²⁺), le magnésium (Mg²⁺) et le fer (Fe²⁺). Les anions présentés sont le chlorure (Cl⁻), le bicarbonate (HCO₃⁻), le sulfate (SO₄²⁻) et le carbonate (CO₃²⁻). Un polygone est dessiné en reliant les points correspondant aux différentes concentrations (Figure 15).



Figure 15 : Représentation des analyses hydrogéochimiques par le diagramme de Stiff (Banton. O et Bangoy. L, 1997)

Il est à noter que la dernière ligne du diagramme de Stiff représentant les concentrations du fer et du carbonate ne figure pas dans les diagrammes tracés sur la carte, ceci est dû au fait que les concentrations en fer n'ont pas été mesurées sur les échantillons.

D'après la répartition des diagrammes de Stiff (Figure 16) et selon la lithologie de la zone cartographiée, on peut distinguer :

- le granite et son arène granitique. Les diagrammes montrent, en général, une faible minéralisation. Les concentrations remarquables, dans quelques cas, de Ca²⁺ et de Na⁺ peuvent être attribuées à la présence des feldspaths calciques ou sodiques ;
- les formations schisteuses à calcaires gréseux ou à nodules carbonatés et gréseux. Ces roches constituent la partie nord-est de la région cartographiée, les diagrammes qui caractérisent cette lithologie présentent, dans leur plus grande partie, de fortes minéralisations en Ca²⁺ et HCO₃⁻. Ceci est expliqué par la richesse des roches calcaires en calcium et bicarbonates ;
- les formations quartzitiques. Ces roches occupent la partie centrale de la zone cartographiée, les diagrammes caractérisant ce faciès lithologique montrent, pour la majorité des cas, de faibles minéralisations. Les roches quartzitiques sont des roches difficilement dissoutes et montrent une composition chimique faible en éléments majeurs.

D'après ces constatations , il est existe donc une forte liaison entre la composition chimiques de l'eau analysée et celle de la roche réservoir.

Toutes les unités hydrogéologiques, définies auparavant, ne sont pas caractérisées d'un point de vu hydrochimiques, par absence de données (hétérogénéité de la répartition des points de prélévements).

VII.2- Caractérisation hydrochimique des eaux dans l'aquifère des arènes granitiques

Les eaux des puits situés dans l'arène granitique sont chloré-sodiques et sont les moins riches en éléments alcalino-terreux du secteur (Tableau 13). Elles sont légèrement plus minéralisées par rapport aux eaux des autres aquifères. Les concentrations remarquables, dans quelques cas, de Ca²⁺ et de Na⁺ peuvent être attribuées à la présence de feldspaths calciques ou sodiques. La forte teneur anormale en NO₃²⁻ peut s'expliquer par une contamination due à l'utilisation du fumier par les paysans. En effet, les fertilisants naturels sont souvent stockés en amas à l'air libre et se lessivent lors des pluies. De plus, l'arène granitique, dont la taille des grains est principalement grossière, constitue un très mauvais filtre pour empêcher la propagation de ces matériaux.

Le tableau ci-dessous reprend les caractéristiques chimiques moyennes	des eaux de
7 puits situés dans l'aquifère des arènes granitiques pour le mois décembre 2002.	

Elément	Unité	valeur
рН	unités pH	6.52
Température	°C	15.72
Conductivité électrique	μS/cm à 20°C	384.32
Calcium	mg/l	31.32
Magnésium	mg/l	9.12
Sodium	mg/l	27.45
Potassium	mg/l	5.4
Nitrates	mg/l	74.00
Sulfates	mg/l	33.23
Chlorures	mg/l	18.10
Bicarbonates	mg/l	39.87

Tableau 13: Caractéristiques hydrochimiques moyennes des eaux de puits situés dans l'aquifère des
arènes granitiques échantillonnées en décembre 2002.

VII.3- Caractérisation hydrochimique des eaux dans les aquifères des schistes métamorphiques et des grès de l'Ordovicien

Les eaux des puits situés dans les schistes de l'auréole métamorphique et des grès de l'Ordovicien présentent un chimisme similaire que celui des eaux des puits situés dans les arènes granitiques. La teneur élevée en bicarbonates dans les aquifères schisto-gréseux peut provenir de la composition chimique du grès dont le ciment peut être calcareux.

Le tableau ci-dessous reprend les caractéristiques chimiques moyennes des eaux de 6 puits dans l'aquifère des schistes pour le mois décembre 2002.

Elément	Unité	valeur
pH	unités pH	6.47
Température	°C	16.55
Conductivité électrique	μS/cm à 20°C	311.37
Calcium	mg/l	28.47
Magnésium	mg/l	12.30
Sodium	mg/l	17.69
Potassium	mg/l	4.45
Nitrates	mg/l	36.19
Sulfates	mg/l	42.08
Chlorures	mg/l	19.17
Bicarbonates	mg/l	72.29

Tableau 14: Caractéristiques hydrochimiques moyennes des eaux de puits situés dans les aquifères schisto-gréseux échantillonnées en décembre 2002.

VII.4- Caractérisation hydrochimique des eaux dans l'aquifère des calcaires du Carbonifère

Ces formations se situent au nord-est du secteur. Les eaux de ces formations sont calciques et les plus carbonatées du plateau d'Oulmès. Elles présentent de fortes concentrations en Ca^{2+} et HCO_3^{2-} (Tableau 15).

Cette richesse en calcium et en carbonate provient de la nature lithologique de l'aquifère des calcaires présentant ce type de faciès.

Le tableau suivant présente les caractéristiques chimiques moyennes des eaux de 5 puits situés dans l'aquifère des calcaires du Carbonifère pour le mois décembre 2002.

Elémént	Unité	valeur
pH	unités pH	7.50
Température	°C	16.15
Conductivité électrique	μS/cm à 20°C	350.50
Calcium	mg/l	63.45
Magnésium	mg/l	7.46
Sodium	mg/l	4.50
Potassium	mg/l	0.75
Nitrates	mg/l	14.83
Sulfates	mg/l	48.34
Chlorures	mg/l	15.53
Bicarbonates	mg/l	160.61

Tableau 15: Caractéristiques hydrochimiques moyennes des eaux de puits situés dans l'aquifère des calcaires du Carbonifère échantillonnées en décembre 2002.

VII.5- Caractérisation hydrochimique des eaux dans l'aquitard quartzitique de l'Ordovicien

Les eaux de cette formation présentent un faciès mixte avec toutefois des concentrations relatives élevées en sulfates et en chlorures.

A noter qu'au niveau de ces aquitards quatzitiques, nous ne disposons que d'une seule analyse chimique réalisée pour le puits P20 en décembre 2002.

Le puits P20 présente des eaux très riche en NO_3^{2-} . Ceci peut être dû à l'utilisation des fertilisants dans l'agriculture de la région.

Le tableau ci-dessous reprend les caractéristiques hydrochimiques des eaux du puits P20 situé dans l'aquitard quartzitique de l'Ordovicien pour le mois décembre 2002.

Elément	Unité	valeur
рН	unités pH	7.00
Température	°C	15.5
Conductivité électrique	μS/cm à 20°C	249
Calcium	mg/l	26.45
Magnésium	mg/l	9.72
Sodium	mg/l	6.00
Potassium	mg/l	0.5
Nitrates	mg/l	75.65
Sulfates	mg/l	10.09
Chlorures	mg/l	17.75
Bicarbonates	mg/l	41.48

Tableau 16: Caractéristiques hydrochimiques des eaux de puits P20 situés dans l'aquifère quartzitiquede l'Ordovicien échantillonnées en décembre 2002.

<u>NB</u>

• La problématique des nitrates, la qualité bactériologique et aussi les pesticides n'ont pas pu être étudiées en détail au stade actuel de l'étude.

VIII- EXPLOITATION DES AQUIFERES

Pour la zone cartographiée, nous disposons de quelques données concernant les volumes prélevés (Figure 17) par la société des eaux minérales d'Oulmès, par l'Office national de l'Eau Potable (ONEP), par les sociétés fermières ou par les paysans. Ces volumes ont été tirés de l'étude « Délimitation du périmètres de protection de la source Sidi Ali » réalisée par la société Geotherma en juillet 1998. malheureusement, ces données sont incomplètes.

Captage de la source de Sidi Ali

Le captage de la source de Sidi Ali est constitué par un puits de 2.20 m de diamètre et d'une profondeur de 13.8 m. L'eau de cette source se trouve au sein des schistes métamorphiques, première auréole qui ceinture le granite. Elle est mise en bouteille par la société des eaux minérales d'Oulmès. Cette eau fait partie des eaux minérales les plus connues au Maroc.

Le débit d'exploitation du site de captage de la source de Sidi Ali est de 5.27 à 5.55 l/s.

Puits de distribution publique

Puits ONEP

Les puits Po1, Po2, Po3 auraient des capacités unitaires de production de l'ordre de 5 à 7 l/s. L'eau de ces puits est destinée à la commune d'Oulmès. Un puits est également actif dans la ville d'Oulmès (le long de la route) mais aucune donnée n'a pu être recueillie à ce sujet.

<u>Forage de Tarmilat</u>

Ce forage récent aurait une capacité de production de 3.5 l/s.

Puits d'irrigation

Compte tenu du mode d'exploitation des ouvrages, il est difficile d'avoir une idée précise des débits unitaires.

Sur le secteur cartographié, les puits de la ferme Bensaleh ont une production de 1 à 3 l/s, excepté le puits B2 qui produit près de 10 l/s.

De façon plus diffuse, existent sur la zone cartographiée d'autres puits équipés de pompe notamment au niveau de petites exploitations agricoles.

Les puits P51 (ferme Ahardan) et P6 (Tizi al kenz) destinés à l'irrigation, ont des débits d'exploitation proches de 7 l/s lorsqu'ils sont en service. Nous ne disposons pas d'autres données sur ces puits.

Pour tous ces puits où le pompage est intermittent, le débit annuel moyen a été calculé en considérant quatre mois de pompage au débit d'exploitation.

Puits à usages variés

Les eaux de ces puits sont utilisées pour des besoins domestiques pour quelques habitations. Ces puits ne disposent pas d'équipement de pompage, l'extraction de l'eau se fait manuellement.

Nous ne disposons d'aucune information sur les débits pompés par les paysans. <u>NB</u>:Les données recueillies sont imprécises et peu abondantes, il est donc nécessaire de parvenir à obtenir l'ensemble des informations relatives au débits exploités dans la zone cartographiée.

Carte de localisation

IX- METHODOLOGIE DE LA REALISATION DE LA CARTE HYDROGEOLOGIQUE

La carte hydrogéologique est réalisée selon deux grands axes de travail. Tout d'abord, elle débute par la collecte et la synthèse d'un maximum de données existantes relatives à l'hydrogéologie de la zone à cartographier, à savoir les données géologiques, hydrologiques, hydrogéologiques. Les informations récoltées pour 172 ouvrages sont encodées dans une banque de données hydrogéologiques géorelationnelle (sous format Microsoft Access) couplée à un système d'information géographique. Celui-ci nous permet de procéder à une visualisation et une analyse spatiale des données en superposant des couches d'informations telles que la topographie, les formations hydrogéologiques, les prises d'eau, ...

La carte hydrogéologique du plateau d'Oulmès est réalisée avec le logiciel SIG Arcview v.3.2, édité par ESRI.

Le SIG et la banque de données hydrogéologiques sont reliés par un lien ODBC. Ce lien permet un dialogue entre la banque de données et le SIG, cette manière permettant la représentation sur le carte hydrogéologique des informations hydrogéologiques contenues dans la banque de données, ainsi que leur mise à jour.

IX.1- Acquisition de données

IX.1.1- Données géologiques

La description géologique du plateau d'Oulmès a été déterminée à partir de la carte géologique d'Oulmès au 1/50000 publiée en 2001, de la carte de Tifoughaline au 1/50000 publiée en 2002, des descriptions des forages de reconnaissance réalisés pour la société ARBOR-OULMES, des thèses, des études et des missions faites dans le cadre de ce projet.

IX.1.2- Données météorologiques

Les données climatiques journalières (précipitations, températures, minimales et maximales) nous ont été fournies par les stations climatiques de la société fermière ARBOR, de la société fermière de BAA (Bensaleh) et d'Oulmès pour la période de 1976 à 2003.

Concernant la radiation solaire journalière, l'humidité de l'air et la vitesse du vent, nous ne disposons que des données de l'année 2002 fournies par la station climatique de la société fermière ARBOR.

IX.1.3- Données hydrogéologiques

a-Localisation des ouvrages

A partir des données acquises lors de différentes études et des missions sur terrain, nous avons pu déterminer 123 puits, 36 piézomètres, 8 sources existantes et 5 ouvrages indéfinis dans le plateau d'Oulmès.

b- Données piézométriques

Plusieurs campagnes de mesures piézométriques ont été effectuées dans la région, à savoir :

- une campagne faite par la société ARBOR-OULMES dans le cadre d'une étude de reconnaissance hydrogéologique qui s'est effectuée entre le 10/10/1982 et le 12/11/1982. 31 piézomètres situés à l'intérieur et à proximité de la ferme d'Arbor ont été relevés.
- Le niveau d'eau a été mesuré au droit de trois missions de terrain effectuées dans le cadre du projet PIP (Projet d'Initiative Propre).
 - ✓ une première mission en décembre 2002, 82 puits ont été relevés.
 - ✓ une deuxième mission durant la première quinzaine du mois de juillet 2003. Les puits relevés ont été au nombre de vingt-un.
 - ✓ une troisième campagne qui s'est déroulée le 21 et le 22/03/2004.

Ces données ont été encodées dans la banque de données.

c-Données hydrochimiques

Les données hydrochimiques ont été acquises lors de deux campagnes de mesures hydrochimiques effectuées dans le cadre du projet PIP.

- une première campagne réalisée le mois de décembre 2002 a couvert 67 points comprenant aussi bien les eaux superficielles (oueds) que les eaux souterraines (puits et sources).
- une deuxième campagne effectuée en juillet 2003 a concerné douze puits représentant principalement des eaux souterraines.

Quelques données hydrochimiques nous ont été fournies suite à une campagne faite par la société ARBOR-OULMES.

Ces données hydrochimiques pour 75 ouvrages ont été encodées dans la banque de données.

IX.2- Banque de données hydrogéologiques

Pour construire la carte hydrogéologique du plateau d'Oulmès, il était nécessaire de disposer d'une banque de données hydrogéologique géorelationnelle.

La banque de données soutenant la carte hydrogéologique du plateau d'Oulmès est basée sur la banque de données conçue par l'équipe du service d'hydrogéologie de département GEOMAC (Gogu et *al*, 2001). Elle est composée de plusieurs couches d'informations relatives aux :

- eaux souterraines (piézomètre, puits, source).
- caractéristiques techniques, aux données quantitatives (hauteurs piézométriques, volumes, ...) et aux données qualitatives (hydrochimie).

Pour chaque ouvrage ainsi défini, nous avons encodé toutes les informations disponibles concernant :

- la localisation (adresse, X, Y, Z), le propriétaire, ...
- ses caractéristiques techniques tels que la diamètre, la profondeur, l'équipement, ...
- son cadre hydrogéologique
- une liste des différents tests réalisés (pompage, chimie, ...)
- des données quantitatives relatives à la piézométrie, ...
- des données qualitatives relatives au caractéristiques hydrochimiques des eaux.

X- PRESENTATION DE LA CARTE HYDROGEOLOGIQUE

La carte hydrogéologique contient :

- □ Une carte hydrogéologique principale au 1/25.000 représentant des informations sur :
 - les unités hydrogéologiques
 - les failles
 - la localisation des ouvrages selon leur type :
 - piézomètre
 - puits
 - source
 - la localisation des stations climatiques
 - les isopièzes, représentant la piézomértie mesurée en décembre 2002
 - le sens probable d'écoulement des eaux souterraines.
 - le réseau hydrographique
 - les routes
 - la topographie

Des cartes thématiques complétant l'information donnée par la carte principale :

- une carte des points d'analyse chimique et des essais de pompage au 1/50.000 localisant :
 - les sites où des données hydrochimiques sont disponibles
 - les sites où les essais de pompage ont été réalisés
- une carte des volumes au 1/50.000 :
 - distinguant les ouvrages de prise d'eau selon leur usage :

 captage de Sidi Ali,
 distribution publique,
 irrigation,
 usages variés.

 présentant les volumes des eaux connus prélevés. Ces volumes ont été tirés du rapport « Etude de la délimitation du périmètre de protection de la source Sidi Ali » faite par la société Geotherma.

A noter que cette carte est incomplète car nous disposons de peu de données.

- une carte de percolation au 1/100.000 représentant les valeurs de la percolation simulée par le sous-modèle hydrogéologique d'EPIC-MAILLE.
- une carte d'évapotranspiration au 1/100.000 représentant les valeurs de l'évapotranspiration simulée par le sous-modèle hydrogéologique d'EPIC-MAILLE pour chaque unité homogène.

□ Une coupe hydrogéologique à deux échelles verticales différentes :

- une coupe hydrogéologique (1/1 c'est-à-dire sans exagération des hauteurs) montrant la structure des formations aquifères
- une coupe hydrogéologique (avec exagération des hauteurs) montrant en plus de la structure des aquifères, le niveau piézométrique. Les hauteurs sont exagérées de 6.25.

Cette coupe est orientée SW-NE et elle recoupe la plupart des unités hydrogéologiques rencontrées sur la carte hydrogéologique.

- <u>*NB*</u> : les pendages des formations hydrogéologiques sont des pendages estimés.
- Un tableau lithostratigraphique représentant les formations géologiques rencontrées dans le plateau d'Oulmès et montrant leur correspondance avec les unités hydrogéologiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Banton O., Bangoy L. (1997) - Hydrogéologie, Multiscience environnementale des eaux souterraines. Edition Pres de l'Université du Québec/AUPELF,136p (livre).

Baudin T., Chevremont P., Razin Ph., Thieblemont D., Rachdi H., Roger J., Benhaourch R., Winckel A., Carte géologique du Maroc au 1/50.000 feuille d'Oulmès. Notes et mémoires du service géologique N°410 bis. Ministère de l'industrie, du commerce, de l'énergie et des mines (*publication*).

Beaudet G. (1969) - Le plateau central marocain et ses bordures, études géomorphologiques (thèse).

Boutaleb M. (1988) - Reconstitution de l'évolution tectono-métamorphique, magmatique et hydrothermale du district stanno-wolframifère de Walmès (Maroc central) (thèse).

Cheddadi M. (2004) - Contribution à l'étude hydrogéologique et hydrochimique du bassin d'Oulmès (travail de fin d'études).

Dadi S. (1998) - Contribution à l'étude hydrologique et hydrochimique du Plateau d'Oulmès (Maroc central, MAROC) (thèse).

Diot H., Bouchez J., Boutaleb M. et Macaudiere J. (1987) - Le granite d'Oulmès (Maroc central) : structure de l'état solide et modèle de mise en place (publication).

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau, Division des Ressources en Eau (1982) - Rapport de forage de reconnaissances et d'essai de plateau d'Oulmès (non publié).

Elbatloussi D. et Laziri F. (2004) - Application du sous-modèle hydrologique d'EPIC-MAILLE à un aquifère fissuré : Cas du plateau d'Oulmès (Maroc central, MAROC) (travail de fin d'études).

Geotherma S.A. (1998) - Etude de délimitation du périmètres de protection de la source Sidi Ali, Phase I (non publié).

Gogu R., Carabin G., Hallet V., Peters V. & Dassargues A. (2001) - GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling, 555-569p, Hydrogeology Journal.

Peannkuch H. (1990) - Elsevier's Dictionary of Environmental Hydrogeology (livre).

Saadi M. (1982) - Carte structurale du maroc au 1/4.000.000 des domaines Mésetien et Atlasique.

Struckmeier F. et Margat J. (1995) - Hydrogeological Maps : A guide and Standard Legend.

Tahiri A. (1991) - Le Maroc central septentrional : stratigraphie, sédimentologie et tectonique du paléozoïque, un exemple de passage des zones internes aux zones externes de la chaîne hercynienne du Maroc (thèse).

Termier H. (1936) - Etudes géologiques sur le Maroc central et le Moyen Atlas septentrional (publication).

2005

Termier H., Agard J. et Owodenko B. (1950) - Les gîtes d'étain et de tungstène de la région d'Oulmès (Maroc central) (*publication*).

UNESCO-OMM, 1992, Glossaire international d'hydrologie, seconde édition, 413p (livre).

Logiciels :

AquaChem v.3.7, © 1998-1999, Waterloo Hydrogeologic, Inc.

AquiferTest v.3.7, © 1998-1999, Waterloo Hydrogeologic, Inc.

Environmental System Research Institute (1992-1999) The ArcView version 3.2 software package documentation. ESRI, Redlands, California.

ANNEXE

Structure de la banque de données hydrogéologiques