

Reconnaissance des ressources en eau du bassin d'Ouarzazate (Sud-Est marocain)

M'bark AGOUSSINE, Mohamed El Mehdi SAIDI & Brahim IGMOULLAN

Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire de GéoSciences et Environnement, B.P. 549, Marrakech. e-mail: agoussine@fstg-marrakech.ac.ma

Résumé. La région d'Ouarzazate est caractérisée par son climat aride à semi-aride. Les précipitations sont faibles (moins de 200 mm/an) et irrégulières. Les écarts de température sont importants et l'évaporation est forte (2800 mm/an en moyenne). Le barrage Mansour Eddahbi régularise un apport moyen annuel de 420 Mm³, dont 233 Mm³ constituent la contribution de l'oued Dadès à la station de Tinouar, et 145 Mm³ celle de l'oued Ouarzazate à la station Amane n'Tini. Les ressources en eau souterraines sont contenues dans trois types d'aquifères contigus ou superposés, d'étendue et d'importance inégales : (1) les réservoirs d'âge jurassique et éocène supérieur de la zone montagneuse septentrionale du Haut Atlas ; les eaux circulant dans l'Eocène sont de mauvaise qualité à cause de la dominance des marnes et de la présence de gypse ; (2) les nappes profondes et semi-profondes de la zone des plateaux contenues dans le Paléocène supérieur et l'Éocène inférieur et moyen sont potentiellement aquifères ; les calcaires du Lias et du Dogger et ceux du Cénomano-Turonien sont de très bons aquifères, mais leur situation à des profondeurs supérieures à 800 m les rend de ce fait un objectif difficile à atteindre ; (3) les nappes phréatiques circulant à la fois dans un matériel néogène remanié constitué de conglomérats, de grès mio-pliocènes et d'alluvions du Quaternaire. Les perméabilités et les extensions des horizons aquifères ainsi que le cheminement des écoulements des eaux souterraines sont en conséquence assez hétérogènes et complexes. L'aridité du climat et ses conséquences hydrogéologiques, les facteurs géographiques et géologiques sont les causes principales de l'augmentation, d'amont en aval, de la salinité des eaux de cet aquifère. Dans les prochaines décennies, l'incertitude des fluctuations climatiques, l'augmentation des besoins socio-économiques, les problèmes de désertification, les risques de pollution, etc. exacerberont les problèmes de disponibilité de cette ressource, en quantité et en qualité.

Mots clés : Maroc, Haut Atlas, bassin d'Ouarzazate, hydrogéologie, ressources en eau, sécheresse.

Recognition of water resources of the Ouarzazate basin (southeastern Morocco).

Abstract. The Ouarzazate area is characterized by a very low and irregular rainfall (less than 200 mm/year) concentrated in short bursts between long rainless periods. The temperature variations are large and the evaporation rates (2800 mm/year on average) regularly exceed rainfall rates. The Mansour Eddahbi dam regulates an annual average contribution of 420 Mm³, of which Dadès river contributes by 233 Mm³ at Tinouar, and oued Ouarzazate by 145 Mm³ at Amane n'Tini. The underground water resources are contained in three adjacent or superimposed types of aquifers which have unequal extent and importance: (1) the Jurassic and late Eocene reservoirs in the northern mountainous zone of the High Atlas; the water flowing in the Eocene layers is of poor quality because of the marls and gypsum high ratio; (2) the deep and semi-deep water tables of the plateau zone, contained in the late Palaeocene and the early and middle Eocene are potentially aquiferous; limestones of the Lias and Dogger, and those of the Cenomanian-Turonian are very good aquifers, but their depth, more than 800 m, makes them difficult to reach; (3) underground water flowing both in altered Neogene material consisting of conglomerates, Mio-Pliocene sandstone and Quaternary alluvial deposits. The permeabilities and the extensions of these aquifer horizons, as well as the advance of the underground water flowing are therefore heterogeneous and complex. The hydrogeological repercussions of climate aridity, the geographical and geological factors are the main causes of the upstream to downstream increase of water salinity of this aquifer. In the following decennies, the uncertain climatic fluctuations, the increase of the social-economic needs, the desertification problems, the pollution risks, etc. will aggravate the problems, either quantitatively or qualitatively.

Key words: Morocco, High Atlas, Ouarzazate basin, hydrogeology, water resources, drought.

INTRODUCTION

Le bassin d'Ouarzazate est caractérisé par les traits de l'aridité. Le développement socio-économique que connaît cette région, sa réputation touristique à l'échelle nationale et internationale, l'investissement dans les grands projets agricoles (par ex. la culture du rosier) sont entravés par l'insuffisance des ressources en eau.

Les possibilités agricoles de la vallée sont limitées malgré que l'agriculture soit la principale activité de la population après le tourisme. La production agricole, malgré sa diversité, est presque entièrement destinée à l'auto-consommation. Elle demeure insuffisante à cause de l'aridité qui sévit dans la région.

Le bassin d'Ouarzazate constitue la partie amont du grand bassin de l'oued Draa, qui recèle environ 7% des ressources en eau souterraine du Maroc (Agoussine & Bouchaou 2004). Ce bassin n'a fait l'objet d'aucune étude hydrogéologique complète. Les rapports de

l'Administration de la région hydraulique d'Agadir (D.R.H.A.) et de l'Office régional de mise en valeur agricole d'Ouarzazate (O.R.M.V.A.O.) traitent les problèmes locaux des ressources en eau. Le projet PNUD-DRPE, MOR/86/004 (Jossen & Filali Moutei 1988) s'est intéressé à la recherche et à l'exploitation des nappes profondes du bassin. Enfin, le projet intégré IMPETUS-Afrique de l'Ouest des universités de Cologne et de Bonn (Allemagne), en collaboration avec plusieurs organismes marocains, a été lancé dans la région d'Ouarzazate pour la période 2000-2008. Ce projet porte sur le bilan hydrique dans la vallée du Drâa et ses implications socio-économiques. Les résultats de ce travail ne sont pas encore publiés.

La présente note tente de définir les possibilités en eau de surface et souterraine du bassin d'Ouarzazate, à la lumière des récentes investigations géologiques, hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques réalisées dans ce secteur.

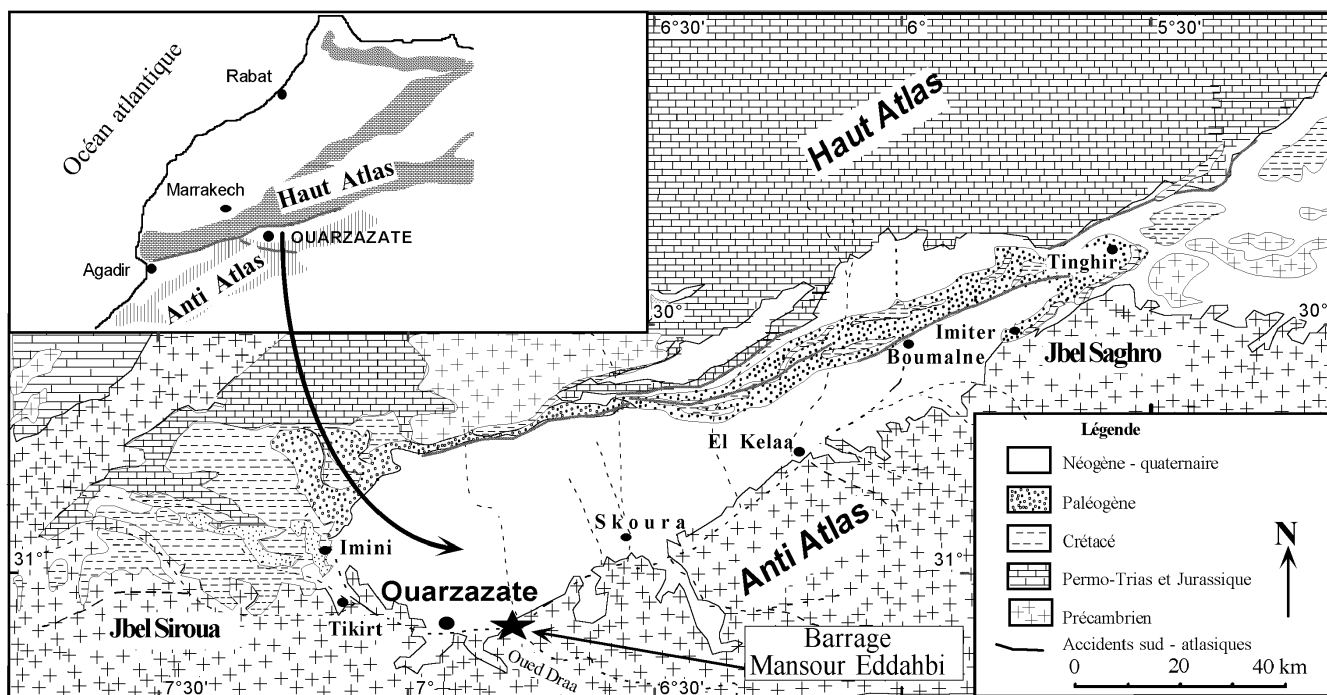


Figure 1. Cadre géologique du bassin d'Ouarzazate (d'après la carte géologique du Maroc au 1/500 000, feuille Ouarzazate, simplifiée).

CONTEXTE PHYSIQUE ET CADRE MORPHO-STRUCTURAL

Le bassin d'Ouarzazate occupe la partie centrale du sillon qui s'est individualisé entre le Haut Atlas et l'Anti-Atlas (Fig. 1). Il est limité au nord par l'Accident sud-atlasique et par les affleurements précambriens de l'Anti-Atlas au sud (boutonnière de Saghro).

C'est un bassin relativement étroit (environ 160 km de long pour une largeur maximale de 45 km au niveau d'Ouarzazate et de Skoura), d'altitude comprise entre 1100 m et 1500 m. Le centre de la cuvette, comblé par les sédiments néogènes et quaternaires, forme une plaine entaillée par les oueds. Dans cette fosse, quatre zones peuvent être distinguées (Jossen & Filali Moutei 1988) (Fig. 2) :

- la Zone axiale, correspondant aux reliefs haut-atlasiques, composée d'un socle rigide et d'une couverture mésozoïque puissante de plus de 2000 m, caractérisée par un système de horsts et de grabens ; elle est limitée au sud par l'Accident sud-atlasique ;
- la Zone sub-atlasique méridionale, ou bordure sud-atlasique, formée de collines de terrains très déformés et chevauchants vers le sud, sur des dépôts néogènes et quaternaires ; dans la région de Toundout, la déformation de la bordure est causée par une tectonique gravitaire en rapport avec le soulèvement du Haut Atlas (Zylka & Jacobshagen 1986) à partir du Crétacé supérieur (Laville *et al.* 1977) ;
- la Zone des Khelas (bassin d'Ouarzazate), correspondant à des plateaux qui s'étendent sur de vastes plaines d'épandage et constituées par des formations néogènes ; ces dernières, impliquées localement dans les plis de la bordure sud-atlasique, deviennent tabulaires vers le sud, où elles

sont entaillées par des oueds et recouvertes par des formations quaternaires (El Harfi 1994) ;

– l'Anti Atlas, représentant un domaine stable formé de roches paléozoïques et précambriennes sur lesquelles repose en discordance une pellicule de sédiments récents.

CONTEXTE GEOLOGIQUE

La chaîne atlasique marocaine est née dans la zone comprise entre le craton ouest-africain et la chaîne hercynienne de l'Afrique du Nord.

Le cycle tectogénétique du Haut Atlas a débuté par des dépôts permo-triasiques discordants sur le substratum précambrien et paléozoïque (Michard 1976). Le Trias est représenté par une épaisse série sédimentaire rouge déposée au sein d'un bassin structuré en horsts et grabens, ce qui explique les importantes variations d'épaisseur. Au sud du Haut Atlas, le Trias est absent, et ce sont les couches rouges du Jurassique continental qui reposent directement en discordance sur le socle paléozoïque (Carte géologique du Maroc au 1/500 000, feuille Ouarzazate) ; en revanche, au nord, se déposent d'épais sédiments marins argileux fins, à intercalations de couches de sel et dont l'origine du matériel détritique est vraisemblablement l'arrière pays anti-atlasique soumis à l'érosion (El Harfi 2001). La fin du Trias et le début du Jurassique sont marqués par des coulées basaltiques en relation avec le rifting de l'Océan atlantique.

Au Jurassique, les dépôts sont contrôlés par un système de failles décrochantes réactivées suite à des distensions saccadées (Laville *et al.* 1977, Ibouh *et al.* 2001, Ibouh 2004). Jossen & Filali Moutei (1988) ont décrit deux faciès dans le versant sud du Haut Atlas : le "Jurassique carbonaté" du Lias inférieur et moyen, pouvant atteindre 1500 m d'épaisseur, et le "Jurassique continental" détritique formé de grès et de conglomérats. Les dépôts diminuent rapidement d'épaisseur en liaison avec les failles bordières

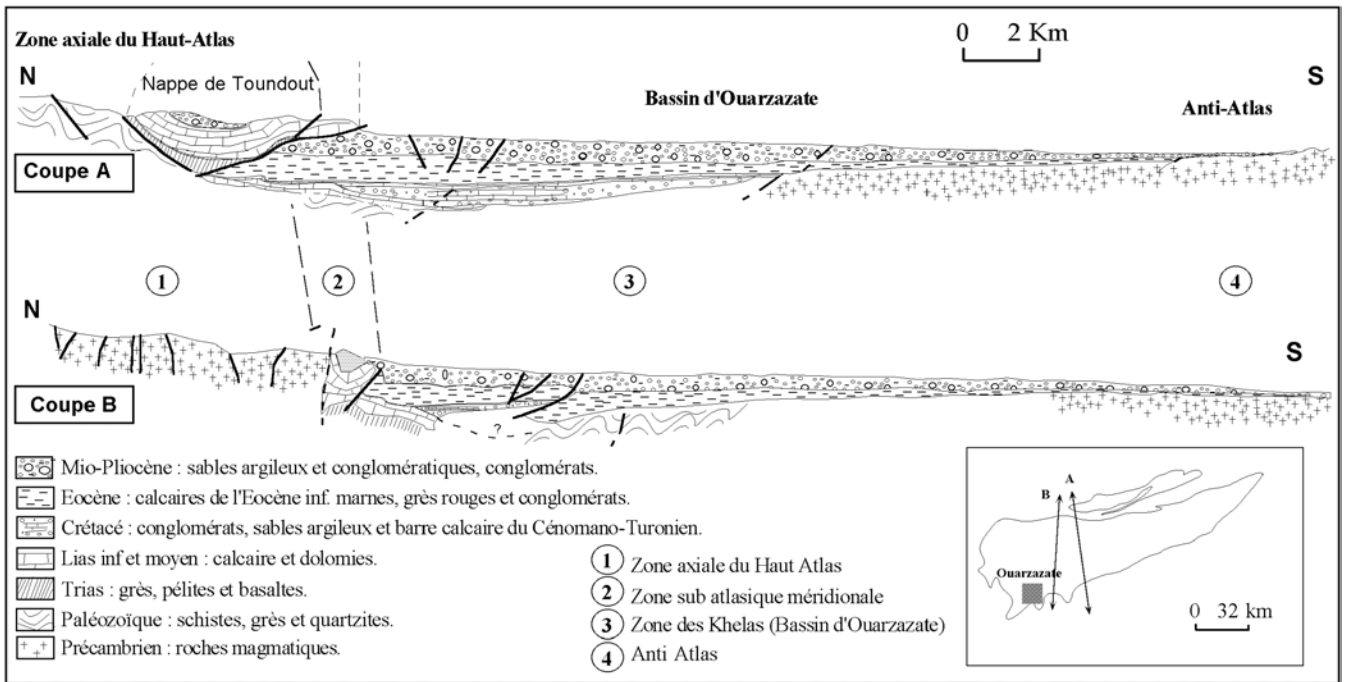


Figure 2. Coupes géologiques transversales du centre du bassin d'Ouarzazate (d'après Jossen & Filali Moutei 1988).

qui limitent la fosse atlasique vers le sud. Le comblement final a eu lieu au Jurassique moyen par une épaisse série détritique. Le Crétacé inférieur de la bordure nord et de l'extrémité ouest du bassin est épais de 100 m à 500 m. Il est représenté par des sédiments détritiques rouges composés de grès et de conglomérats fluviaux à lagunaires (présence de lignites et d'évaporites). Le milieu devient marin avec le dépôt de dolomies fossilifères dans la partie orientale. La transgression du Cénomano-Turonien a déposé des carbonates ne dépassant pas 30 m d'épaisseur dans la vallée du Dadès. La barre carbonatée correspondante est subdivisée en deux unités : les calcaires massifs à Astartes et Exogyres et les calcaires lités à silex (Jossen & Filali Moutei 1988).

Le Sénonien est un ensemble monotone de sables roses et rouges plus ou moins argileux, avec des lits de gypse fibreux.

Ces formations lagunaires sont épaisses de 50 m à 100 m près du Jbel Saghro et de 250 m à 300 m dans le bassin d'Imini.

Du point de vue tectonique, les calcaires cénomano-turonien ont été déposés pendant une période relativement calme, alors que le Sénonien a été une période d'activité

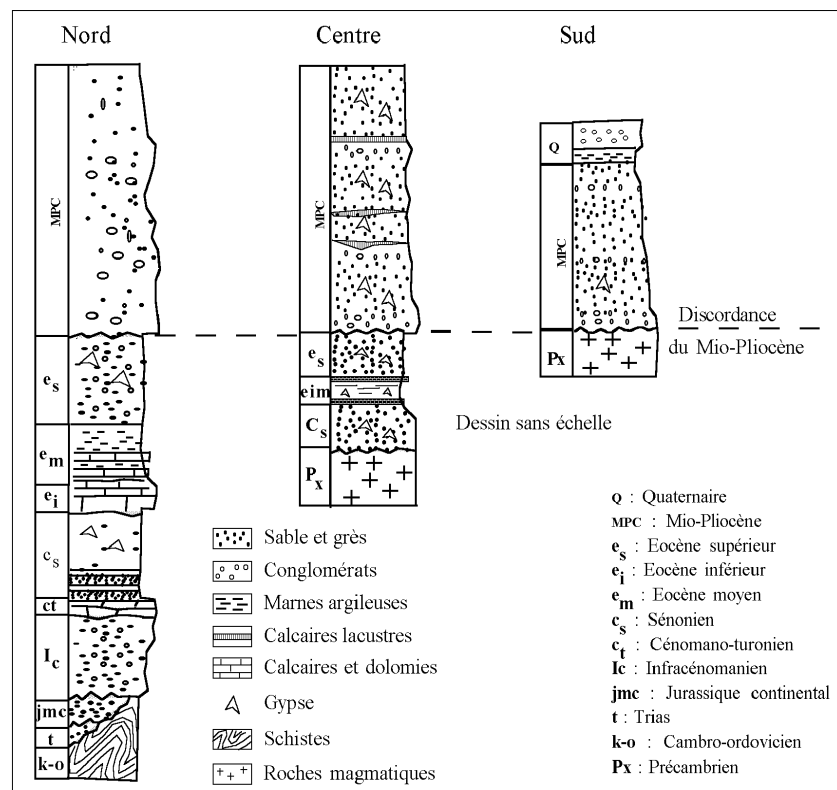


Figure 3. Colonnes stratigraphiques synthétiques du bassin d'Ouarzazate (d'après Jossen & Filali Moutei 1988).

tectonique qui a entraîné la reprise de la subsidence du bassin et le retour à une sédimentation détritique, liée au soulèvement d'ensemble de cette zone qui est déjà soumise à l'érosion. Laville (1980) associe la mise en place de la nappe de Toundout à cet événement. Les affleurements du Crétacé supérieur longent l'Accident sud-atlasique d'une manière continue d'ouest en est.

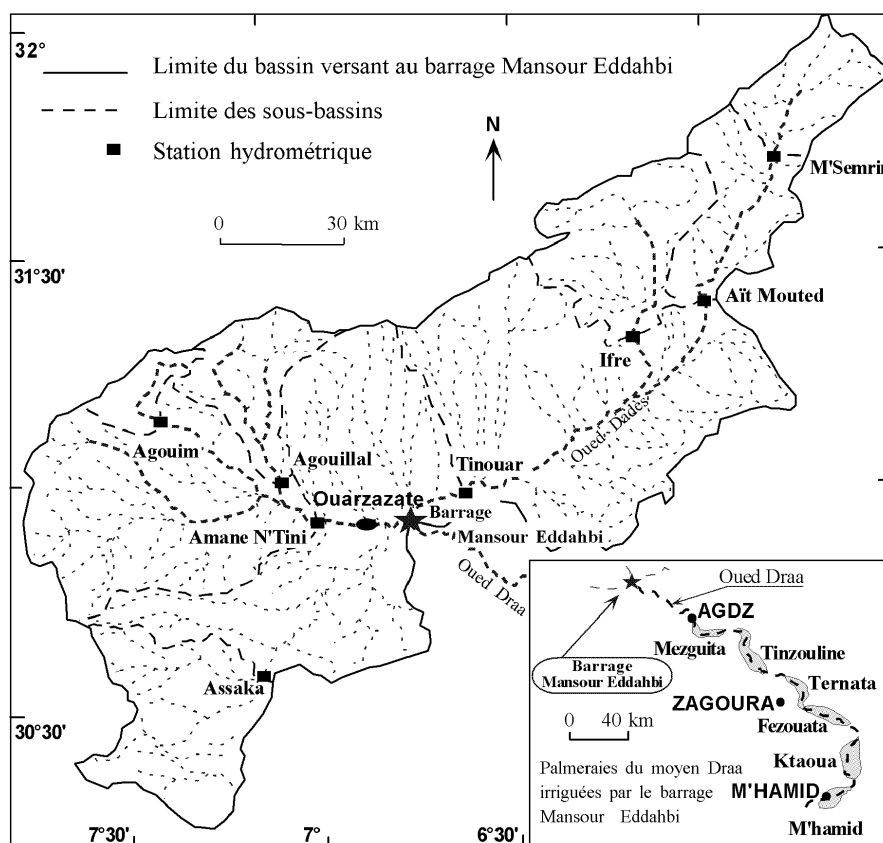


Figure 4. Situation des stations hydrométriques du bassin versant au barrage Mansour Eddahbi.

Le Paléocène correspond à un ensemble de calcaires et de grès alternant avec des marnes, montrant une forte variation latérale de faciès sur de faibles distances. L'Eocène inférieur phosphaté est subdivisé en plusieurs unités marines représentées par des grès coquilliers et des niveaux calcaires peu épais, séparés par des horizons marneux et des formations détritiques grossières. La puissance de cet ensemble est de l'ordre de 40 m, mais elle peut atteindre 100 m à M'goun (Cappetta *et al.* 1987). L'Eocène moyen, puissant de 30 à 40 m, débute par un ensemble calcaire formé de plusieurs barres séparées par des niveaux marneux. A l'Eocène supérieur, ces dépôts passent progressivement à des grès et à des conglomérats continentaux. C'est une série laguno-continentale rouge essentiellement détritique. Elle se distingue du Sénonien par l'absence de niveaux marins et par la présence de calcaires lacustres et de conglomérats qui deviennent plus abondants à proximité du Haut Atlas (El Harfi 1994). Les faciès sont très conglomératiques dans la vallée du Dadès où la puissance maximale est de 400 m (Gauthier 1960).

L'Oligocène et le Mio-Pliocène recouvrent en discordance les formations sous-jacentes. Leurs faciès sont très variables : grès, sables et conglomérats, calcaires lacustres et argiles à gypses. A proximité du Haut Atlas, les poudingues grossiers passent à des micro-conglomérats puis à des sables fins gypsifères avec des intercalations de calcaires lacustres. Localement, se déposent des argiles sableuses et gypseuses. Près de l'Anti-Atlas, les sédiments sont plus grossiers, sables roses et arènes à galets et

cailloux provenant de l'érosion du Jbel Saghro. L'épaisseur du Mio-Pliocène est évaluée à 1200 m (Görler *et al.* 1987).

Au Quaternaire, les dépôts alluviaux se différencient par leur altimétrie et leur faciès (El Harfi 2001). Les conglomérats des regs anciens et moyens qui couronnent les buttes sont stériles en eau. Les alluvions récentes qui sont surmontées de limons constituent de très bons réservoirs des nappes alluviales. Des dépôts lacustres et des travertins liés à des sources affleurent de façon sporadique et discontinue avec généralement de faibles épaisseurs.

CONTEXTE CLIMATIQUE

Plusieurs paramètres permettent de caractériser le climat de la région d'Ouarzazate et d'évaluer son degré d'aridité. Ainsi, l'indice d'aridité de De Martonne, qui utilise les hauteurs annuelles des précipitations (P en mm), et les températures moyennes annuelles (T en °C) $I=P/(T+10)$, permet de placer une station donnée dans l'étage aride ($I < 10$), semi-aride ($10 < I < 20$) ou humide ($I > 20$) (De Martonne 1948).

Les résultats pour les stations du bassin hydrographique d'Ouarzazate (Fig. 4) sont indiqués au Tableau I.

Il ressort de ces résultats que la station d'Agouim se trouve dans l'étage semi-aride, celle de M'Semrir dans un étage climatique intermédiaire entre l'aride et le semi-aride, alors que toutes les autres stations sont situées dans l'étage aride.

Ces résultats sont confirmés par l'indice pluviométrique de Moral (IM), qui utilise aussi la hauteur annuelle des

Tableau I. Caractérisation du climat dans le bassin d'Ouarzazate d'après les indices de De Martonne (I) et de Moral (IM).

Station	I	Etage climatique	IM	Etage climatique
Agouim	11,4	Semi-aride	1,04	Limite aride - humide
Agouillal	4,8	Aride	0,39	Aride
Assaka	4,7	Aride	0,39	Aride
Barrage	3,7	Aride	0,28	Aride
Ifre	6,7	Aride	0,58	Aride
Ait Mouted	6,2	Aride	0,53	Aride
M'Semrir	9,5	Aride à semi-aride	0,93	Aride

précipitations (P en mm) et les températures moyennes annuelles (T en °C) pour délimiter l'humidité et la sécheresse : $IM = P / (T^2 - 10T + 200)$ avec $IM < 1$ pour un climat sec et $IM > 1$ pour un climat humide (Guyot 1999). Les résultats pour ces stations sont indiqués au Tableau I.

Le quotient pluviothermique d'Emberger, qui utilise la moyenne des températures minimales du mois le plus froid et la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud, a permis de placer les stations climatiques d'Agouim et de M'Semrir dans l'étage bioclimatique aride et les autres stations dans l'étage bioclimatique saharien.

La région d'Ouarzazate fait donc globalement partie de l'étage bioclimatique saharien caractérisé par son climat aride à semi-aride. L'existence du massif élevé du Siroua (Fig. 1), constitue un obstacle vis-à-vis des influences océaniques. L'orientation SW-NE de ce massif fait que les influences sahariennes se font sentir beaucoup plus profondément vers le nord-est.

Les paramètres climatiques, mesurés ou calculés au niveau des différentes stations que compte le bassin (Fig. 4), sont

récapitulés dans le Tableau II. Ces résultats caractérisent, dans l'ensemble, un climat contraignant de type aride à semi-aride, avec :

- une pluviométrie faible et irrégulière (Figs. 5 et 6) ; l'analyse de la pluviométrie de la région met en évidence l'existence de deux saisons relativement humides en automne et à la fin de l'hiver, séparées par un début d'hiver généralement moins pluvieux et un été particulièrement sec ; la figure 7 illustre le cas de la station d'Ouarzazate ; le nombre de jours de pluie par an est en moyenne de 15 à 30 selon les stations, la moyenne inter-annuelle des précipitations sur le bassin versant au barrage Mansour Eddahbi est de 170 mm ;
- des températures moyennes annuelles variant entre 12°C et 22°C ; l'hiver est très rigoureux et les températures maximales sont relativement élevées par rapport à la latitude de la région ; la figure 8 illustre la répartition moyenne mensuelle des températures au barrage Mansour Eddahbi ;
- une humidité relative faible (40% en moyenne) ;
- une forte évaporation, variant entre 2300 mm et 3300 mm par an.

Le climat est encore compliqué par la présence de barrières montagneuses accusées qui créent des zones climatiques différenciées dans les vallées encaissées des oueds du Haut Atlas (cas d'Agouim et de M'semrir). L'insuffisance des précipitations se trouve aggravée par l'irrégularité annuelle et inter-annuelle. La variabilité du climat est caractérisée tantôt par des périodes de sécheresse prolongées, tantôt par des périodes de fortes crues.

RESSOURCES EN EAU DE SURFACE

Au site du barrage Mansour Eddahbi (15 000 km²), les deux principaux affluents de l'oued Draa, l'oued Dadès (7600 km²) et l'oued Ouarzazate (7400 km²), collectent les eaux des versants sud du Haut Atlas et nord de l'Anti Atlas (Fig. 4).

Tableau II: Paramètres climatiques dans le bassin d'Ouarzazate. HM, pluie de l'année la plus humide ; Hm, pluie de l'année la plus sèche.

Station	Pluies		T. moy. (°C)	Evaporation (mm / an)			Humidité relative (%)	ETR Turc (mm / an)
	P(mm)	HM/Hm		Colorado	Piche	Bac A		
Agouim	281	13,1	14,7	2269,4	3106,3	-	39	248
Agouillal	133	9,2	17,7	-	3577,5	-	34	140
Ouarzazate	117	13,4	-	-	-	-	-	-
Assaka	127	15,5	17,2	-	4217,1	3298,0	40	144
Barrage	107	10,4	19,2	2856,4	3166,3	3253,1	46	117
Amame N'Tini	113	12,4	-	-	-	-	-	-
Tinouar	106	8,8	-	-	-	-	-	-
Ifre	176	14,9	16,4	2403,0	2896,3	-	41	178
Ait Mouted	167	10,0	16,9	3340,6	3279,3	-	38	174
M'Semrir	212	4,5	12,2	-	2529,0	-	43	217

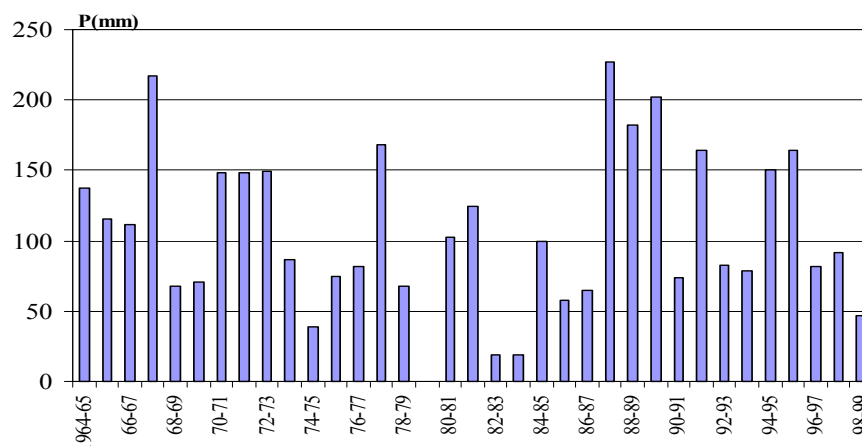


Figure 5. Pluies moyennes inter-annuelles à Ouarzazate (période 1964-1965 à 1998-1999).

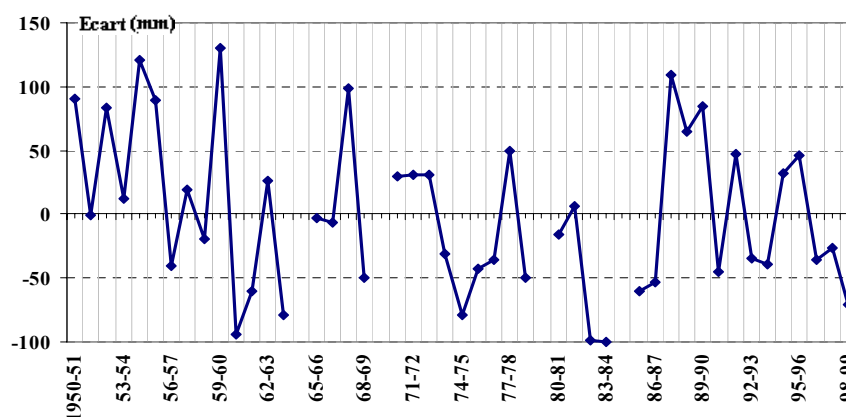


Figure 6. Ecart à la moyenne des pluies annuelles à Ouarzazate (période 1964-1965 à 1997-1998).

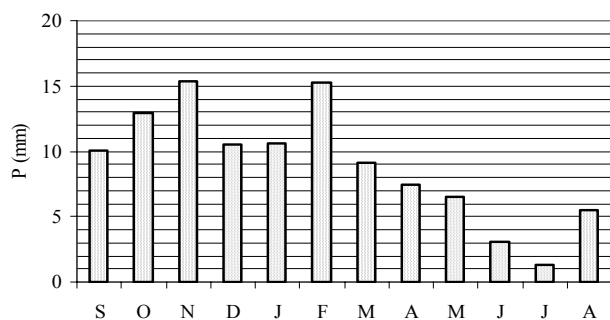


Figure 7. Pluies moyennes mensuelles à Ouarzazate (période 1964-1965 à 1998-1999).

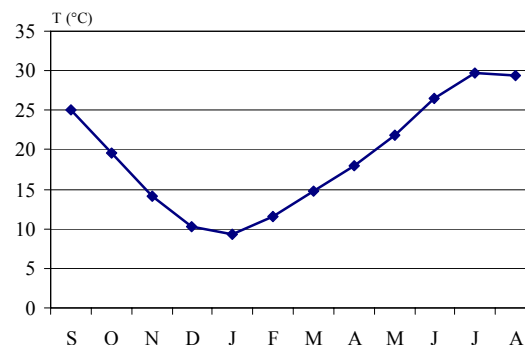


Figure 8. Températures moyennes mensuelles au barrage Mansour Eddahbi (période 1975-1976 à 1997-1998).

Le régime des cours d'eau du bassin d'Ouarzazate, représenté par les débits moyens mensuels au niveau des différentes stations, est illustré dans la figure 9. Le régime annuel des principaux affluents atlasiques (Agouillal, Amane n'Tini et Aït Mouted) est de type nival. Les crues d'automne sont en général peu nombreuses mais peuvent être importantes en termes de volume apporté. En moyenne, le nombre de crues est de deux par an.

La participation des deux principaux affluents de l'oued Draa (oued Dadès et oued Ouarzazate) aux apports au niveau du barrage Mansour Eddahbi (Tabl. III) est illustré, pour l'oued Dadès, par le débit moyen annuel au niveau de

Tinouar (7,4 m³/s, soit 233 Mm³/an) et pour l'oued Ouarzazate par le débit moyen annuel au niveau d'Amane n'Tini (4,6 m³/s, soit 145 Mm³/an). D'une saison à l'autre (Fig. 9) et d'une année à l'autre (Fig. 10), le régime hydrologique de ces oueds est très irrégulier. La moyenne inter-annuelle des débits est de 7,4 m³/s à Tinouar (écart-type = 7,3 et coefficient de variation = 99%) et 4,6 m³/s à Amane n'Tini (écart-type = 3,7 et coefficient de variation = 79%).

Le barrage Mansour Eddahbi a été construit sur l'oued Draa à 25 km de la ville d'Ouarzazate, dans le but d'assurer la mise en valeur de six palmeraies du Draa moyen (Mezguita,

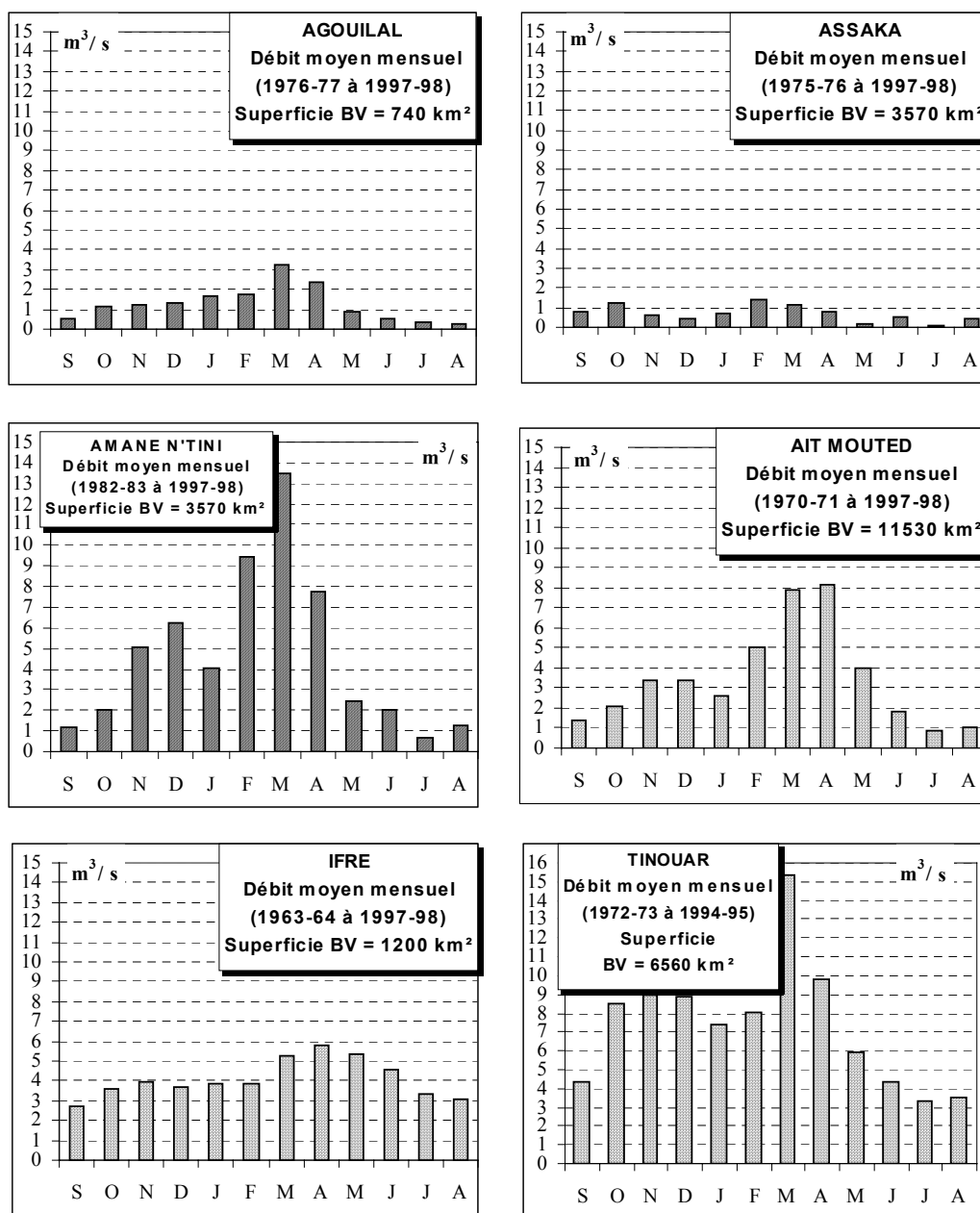


Figure 9. Apports moyens mensuels des principaux oueds du bassin d'Ouarzazate. Agouilal, Assaka et Amane n'Tini sur l'oued Ouarzazate ; Ait Mouted, Ifre et Tinouar sur l'oued Dadès.

Tableau III: Débits caractéristiques au niveau des différentes stations hydrométriques du bassin d'Ouarzazate. DCM, débit caractéristique maximum (débit dépassé 10 jours par an) ; DCE, débit caractéristique d'étiage (débit dépassé 365 jours par an).

	Sous bassin	Période d'observation	Superficie (km^2)	DCM (m^3/s)	DCE (m^3/s)	Module annuel (m^3/s)
Oued Dadès	Ait Mouted	1970-71/97-98	1530	20	0,07	3,5
	Ifre	1963-64/96-97	1200	12	0,8	5,5
	Tinouar	1972-73/95-96	6560	37	0,05	7,4
Oued Ouarzazate	Agouilal	1976-77/97-98	740	7	0,00	1,3
	Amane N'Tini	1982-83/97-98	3570	30	0,08	4,6

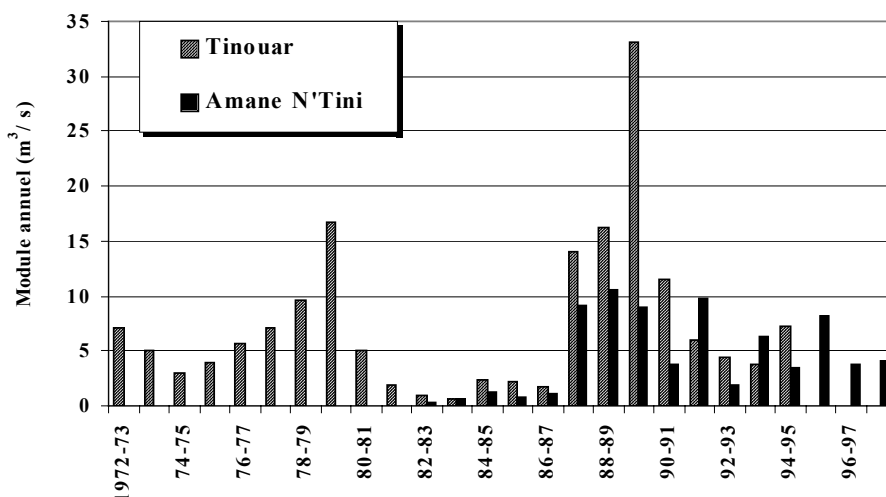


Figure 10. Variation interannuelle des débits des oueds Dadès à Tinouar et Ouarzazate à Amane n'Tini

Tinzouline, Ternata, Fezouata, Ktaoua et M'hamid) d'une superficie totale de 25 720 ha, se succédant entre Agdz et M'hamid sur une longueur d'environ 160 km (Fig. 4). Cet ouvrage a été mis en service en 1972, et il est d'une capacité initiale de 560 Mm³ (460 Mm³ actuellement). Il régularise un apport moyen annuel d'environ 420 Mm³/an. Ce barrage est destiné à limiter les effets dévastateurs des crues, à régulariser le débit de l'oued Draa et à maîtriser l'exploitation des eaux. Il assure également l'alimentation en eau potable de la ville d'Ouarzazate. Au niveau de ce barrage, l'oued Draa a un régime qui reste fonction des caractéristiques hydrologiques de l'oued Dadès et de l'oued Ouarzazate. Les débits moyens annuels varient de 0,5 m³/s en relief à près de 14 m³/s au niveau du barrage Mansour Eddahbi.

Les eaux superficielles, facilement accessibles, constituent la ressource la plus exploitée et explique le regroupement des populations le long des vallées où les cours d'eau sont pérennes ou semi-pérennes, ce qui leur assure un approvisionnement en eau à usage domestique et agricole. L'absence de couvert végétal sur la majeure partie du bassin amplifie le caractère violent des crues, entraînant une forte érosion des terres et un envasement moyen annuel du barrage Mansour Eddahbi, de 280 m³/km² du bassin versant (Agoussine 2003).

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

Le contexte morphologique et structural du bassin d'Ouarzazate fait ressortir plusieurs réservoirs contigus ou superposés d'étendue et importance inégales. Les potentialités qu'ils peuvent offrir, ainsi que leurs conditions d'accès, sont également très différentes. Trois ensembles peuvent être distingués : les réservoirs potentiels de la zone montagneuse septentrionale, les nappes profondes et semi-profondes de la zone des plateaux (bassin d'Ouarzazate), et les nappes phréatiques circulant dans les formations quaternaires et mio-pliocènes.

Les réservoirs potentiels de la zone montagneuse septentrionale. Il s'agit principalement du Jurassique et de

l'Eocène supérieur. Le Jurassique est carbonaté, dolomitique et gréseux et donne naissance à de nombreuses sources d'importance variable et participant au débit de base des oueds (ex. oued M'goun). L'Eocène supérieur, essentiellement détritique, est formé de grès, de marnes roses gypseuses et de marno-calcaires. La lithologie marneuse dominante et la présence de gypse rendent les eaux qui circulent dans ces formations de mauvaise qualité ; leurs potentialités en eau sont *a priori* très limitées. L'Eocène moyen, présentant une bonne perméabilité, est un niveau aquifère important lorsqu'il est accessible. Les assises sénoniennes qui dominent dans ce secteur sont essentiellement argileuses, ce qui limite la perméabilité des quelques bancs de grès qui s'y intercalent. La qualité de l'eau est mauvaise en raison de la présence de gypse.

Les nappes profondes et semi-profondes de la zone des plateaux (bassin d'Ouarzazate). Les calcaires du Lias et du Dogger et ceux du Cénomano-Turonien sont de très bons aquifères et se situent à des profondeurs supérieures à 800 m. Il est de ce fait des objectifs difficiles à atteindre. Le Paléocène supérieur et l'Éocène inférieur et moyen représentent un objectif important à reconnaître. En effet, la série comporte plusieurs séries marines représentées par des grès coquilliers et des niveaux calcaires peu épais, séparés par des horizons marneux et des formations détritiques grossières. La perméabilité de cet ensemble et sa puissance laissent espérer l'existence de réservoirs potentiels en profondeur.

Les nappes phréatiques des formations quaternaires et mio-pliocènes. Les nappes phréatiques et alluviales du M'goun-Dadès couvrent quelques dizaines de km le long des vallées. Elles sont issues du sous-écoulement des oueds éponymes et des infiltrations d'eau dans les cônes de déjection du versant nord du Haut Atlas et dans les terrasses récentes. A l'amont, elles circulent essentiellement dans l'alluvionnement produit par les oueds au passage dans les grès tendres de l'Éocène supérieur des synclinaux de la région. A l'aval, elles circulent dans les terrasses récentes et les glacis alluvionnaires du Quaternaire. Au cours des dernières années, ces nappes ont été activement exploitées

au moyen de puits traditionnels. Leur puissance est réduite (14 m à Ouarzazate et 40 m à Skoura). Elles sont intimement liées au régime d'écoulement des oueds. L'interprétation des essais de pompage réalisés par la D.R.H.A., le plus souvent dans des puits de faible profondeur (11 m à 28 m) ont montré que la transmissivité de l'aquifère alluvial est de 1.10^{-4} à 5.10^{-4} m²/s et que le coefficient d'emmagasinement varie de 6% à 40%. Les faibles valeurs de la transmissivité de ces formations pourraient s'expliquer par leur faible perméabilité due à la dominance des faciès fins.

La surface de la nappe alluviale déborde généralement les limites de la vallée ; le sous-écoulement s'élargit dans la plaine et constitue une véritable nappe phréatique. La nappe alluviale est alors en continuité hydrodynamique avec celle, plus étendue, qui circule dans des formations oligocènes et mio-pliocènes. La nappe qui circule dans ces dernières

formations a été en effet mise en évidence dans tous les sondages de reconnaissance et puits qui ont traversé ces formations (Fig. 11). Les dépôts y sont argileux, épais et peu perméables ; cependant, ils sont plus détritiques dans l'est (argiles sableuses, argiles intercalées de cailloutis, conglomérats) et sont alors perméables. La nappe est principalement libre ; des secteurs de semi-captivité ont été néanmoins mis en évidence dans les conglomérats, sables et grès du Mio-Pliocène, lorsque les horizons argileux de couverture sont relativement épais. Cet aquifère présente assurément une certaine discontinuité à cause de la forme lenticulaire des corps du Mio-Pliocène (Fig. 12). La structure géologique de la bordure et du centre de la cuvette pourrait participer à l'alimentation des ces nappes soit par abouchement avec les aquifères du Haut Atlas en bordure nord, soit au centre par des échanges avec les nappes profondes et semi-profondes.

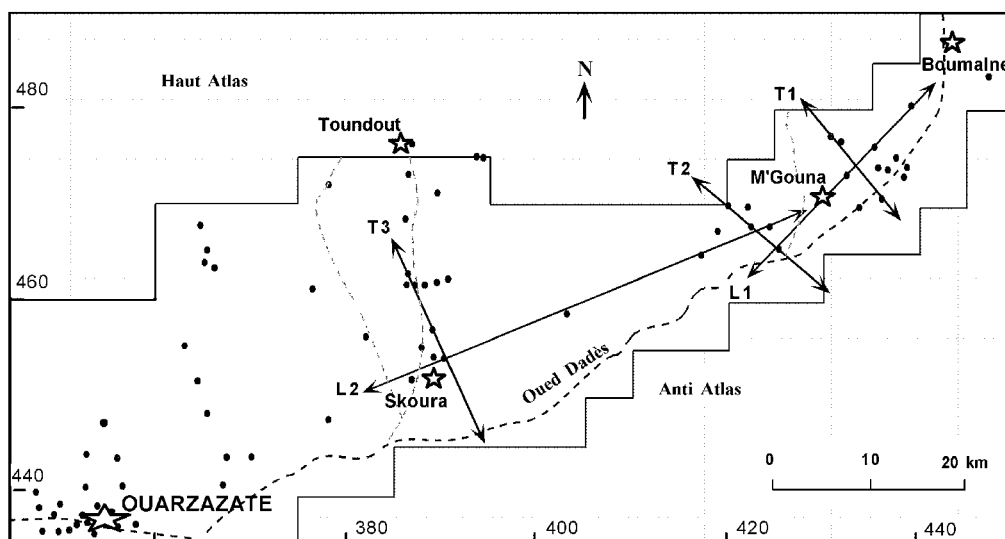


Figure 11. Localisation des sondages de reconnaissance et coupes corrélatives dans la plaine d'Ouarzazate.

Le schéma est en définitive celui d'une nappe phréatique pratiquement généralisée qui circule, à la fois, dans un matériel néogène remanié constitué de conglomérats, de grès mio-pliocènes et d'alluvions du Quaternaire. La carte piézométrique (Fig. 13), établie à partir des données recueillies à la D.R.H.A., représente l'aquifère alluvial de la plaine. Vue d'ensemble, cette carte montre un écoulement général des eaux à la fois du NE, le long de l'oued Dadès, et du nord, à partir du Haut Atlas. L'évolution piézométrique (Fig. 14) dans les trois secteurs importants de la région (Ouarzazate, Skoura et M'gouna) montre une variation du niveau comprise entre 1 et 3 m. Les perméabilités et les extensions des horizons aquifères ainsi que le cheminement des écoulements des eaux souterraines sont assez hétérogènes et complexes.

Dans le versant sud du Haut Atlas qui semble alimenter la nappe phréatique, la classification hydrochimique des eaux (Fig. 15) est fonction de leur origine géologique (Reichert *et al.* 2003). La minéralisation des eaux de la nappe phréatique représentée par la conductivité électrique (Fig.

16) augmente de l'amont vers l'aval du bassin et semble provenir essentiellement du Haut Atlas. L'origine de l'augmentation de la concentration des sels pendant leur circulation est double : le lessivage des terrains triasiques par les eaux de surface qui alimentent la nappe au niveau de l'aquifère alluvial et la circulation des eaux souterraines dans des formations avec des niveaux marneux et du gypse.

Dans la plaine, des problèmes de salinité des sols se posent avec acuité de plus en plus grande. En effet, dans les zones d'émergence ou de faible profondeur de nappe phréatique, l'eau remonte par capillarité et engendre des dépôts de sels en surface, auxquels s'ajoutent les sels dissous déposés à la suite d'évaporation des eaux de crues et d'irrigation.

CONCLUSIONS

La région d'Ouarzazate fait donc partie, globalement, de l'étage bioclimatique saharien caractérisé par son climat aride à semi-aride. Les précipitations sont irrégulières et leur moyenne est faible et l'évaporation est très forte.

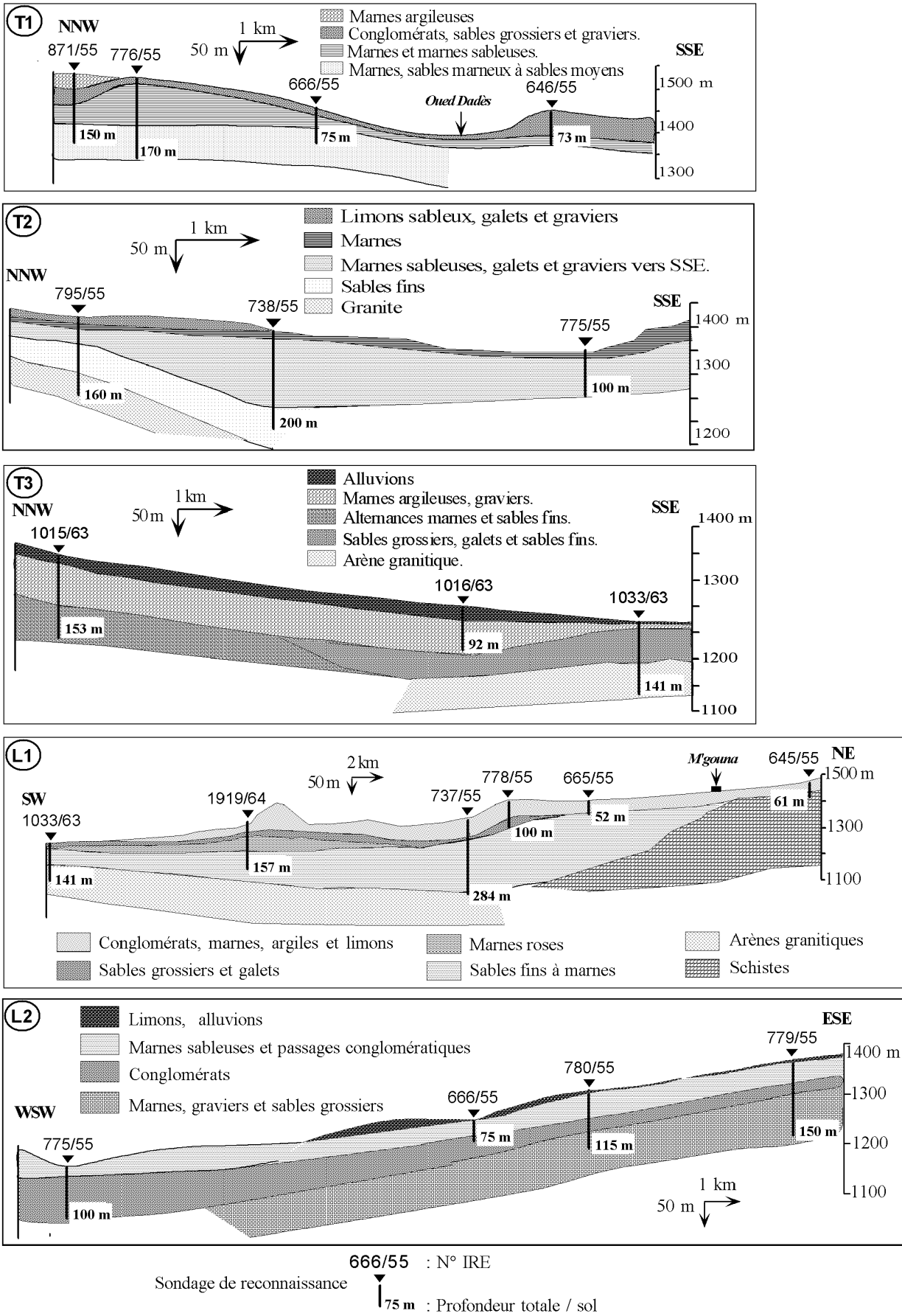


Figure 12. Coupes corrélatives transversales et longitudinales de la plaine du bassin d'Ouarzazate (localisation à la figure 11).

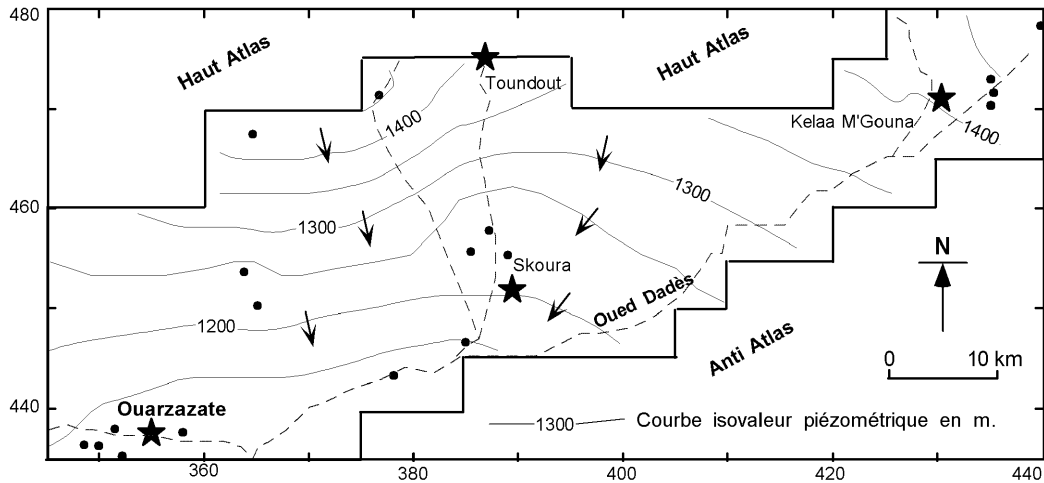


Figure 13. Plaine d'Ouarzazate, piézométrie d'avril 1998, 27 points de mesure (données de la D. R. H. A.)

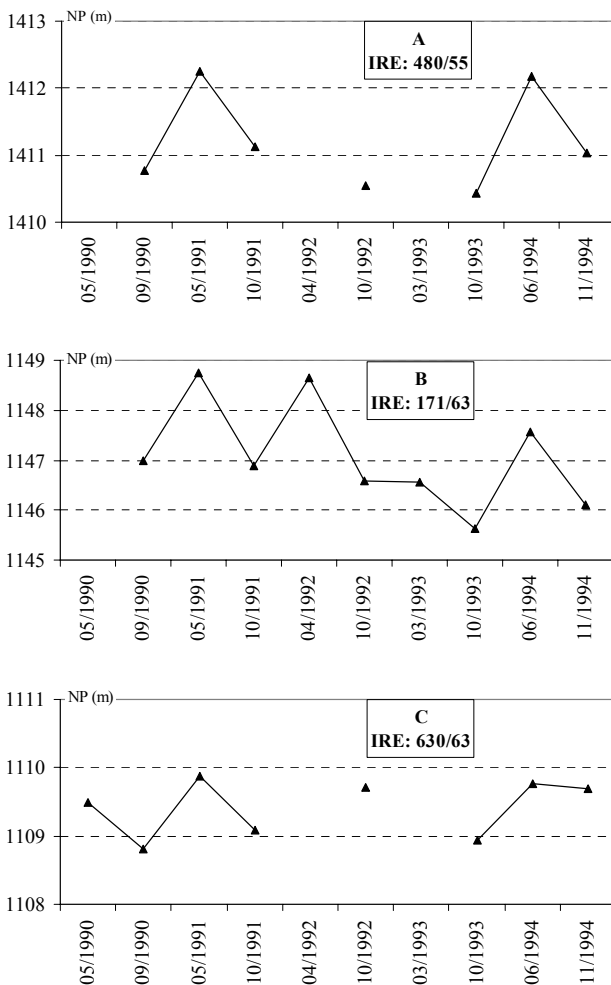


Figure 14. Plaine d'Ouarzazate- Evolution piézométrie de la nappe alluviale. A, M'Goun ; B, Skoura ; C, Ouarzazate (données D.R.H. Agadir)

L'apport moyen, en eau de surface, du bassin versant au barrage Mansour Eddahbi est très variable. Le potentiel en eau souterraine du bassin est assez important mais difficilement accessible. Les eaux les plus exploitées sont

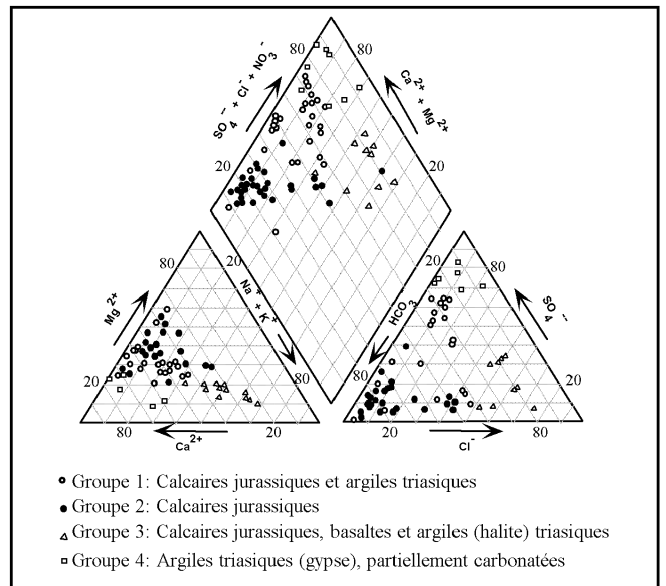


Figure 15. Classification hydrochimique des eaux du bassin d'Ouarzazate (Reichert *et al.* 2003).

celles de la nappe phréatique alluviale (oueds Dadès, M'Goun et Ouarzazate) et mio-pliocène. La qualité de cette eau se détériore de l'amont vers l'aval par augmentation de la minéralisation, ce qui entraîne une augmentation de la salinisation des sols après évaporation de l'eau.

Notre travail a porté essentiellement sur la synthèse des connaissances hydrogéologiques acquises sur le bassin d'Ouarzazate. Faute de travaux hydrogéologiques synthétiques, comme il a été signalé en introduction, aucune comparaison ni discussion n'est actuellement possible. Les premières conclusions permettent de dire qu'en matière des ressources en eau, la région connaît un triple défi : une ressource en eau de plus en plus rare, une augmentation rapide des besoins, une modification de sa qualité et des problèmes de salinisation des sols.

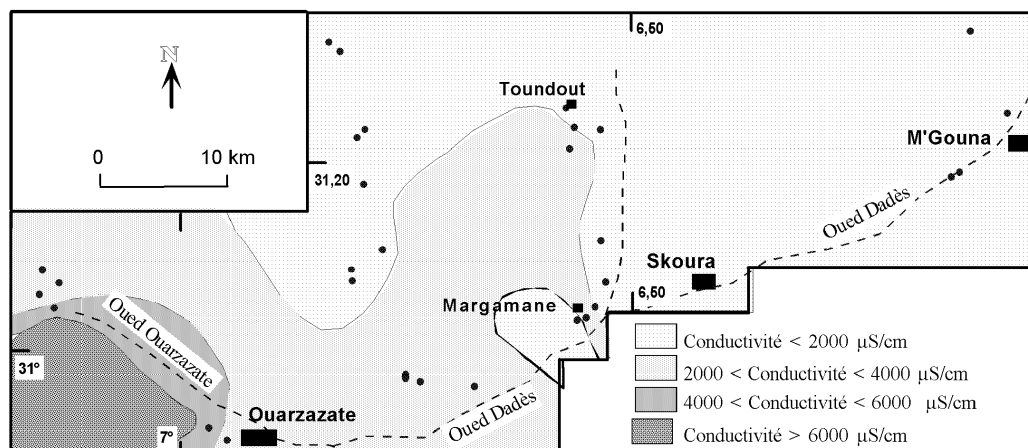


Figure 16. Minéralisation des eaux (conductivités électriques) des eaux de la nappe phréatique du bassin d'Ouarzazate (33 points de mesure).

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude à M. B. El Mansouri (Université Ibn Tofayl, Faculté des Sciences, Kénitra) et à un

évaluateur anonyme pour leurs remarques et suggestions, qui ont permis d'améliorer la première version du manuscrit.

Références

- Agoussine M. 2003. Les divers aspects de l'hydrologie en régions arides et semi arides - cas du sud-est marocain. *Terre & Vie*, Rabat, 70.
- Agoussine M. & Bouchaou L. 2004. Les problèmes majeurs de la gestion de l'eau au Maroc. *Sécheresse*, 15, 2, 187-194.
- Cappetta H., Jaeger J.J., Sabatier B., Sigé B., Sudre J. & Vianey-Liaud M. 1987. Complément et précisions biostratigraphiques sur la faune paléocène à Mammifères et Sélaciens du bassin d'Ouarzazate (Maroc). *Tertiary Res.*, 8, 4, 625-648.
- De Martonne E. 1948. *Traité de géographie physique*. 3 tomes. Editions Armand Colin, Paris, 917 p.
- El Harfi A. 1994. *Dynamique sédimentaire des séries continentales tertiaires au Sud du Haut Atlas central (région d'Ouarzazate et Anzal, Maroc). Faciès et milieu de dépôt – évolution diagénétique et pédogénétique*. Thèse Doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, France, 313 p.
- El Harfi A. 2001. *Evolution tectono-sédimentaire du versant sud du Haut Atlas central au cours du Cénozoïque (bassin d'avant-chaîne d'Ouarzazate)*. Thèse d'Etat es Sciences, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 340 p.
- Gauthier H. 1960. Contribution à l'étude géologique des formations post-liasiques des bassins du Dadès et du Haut Toudra (Maroc méridional). *Notes & Mem. Serv. géol. Maroc*, 119, 212 p.
- Görler K., Helmdach F. F. & Zucht M. 1987. Continental Neogene south of the central High Atlas Mountains. *14th Coll. Afr. Geol.*, Berlin (West), Rotterdam, 133-136.
- Guyot G. 1999. *Climatologie de l'environnement*. Editions Dunod, Paris, 544 p.
- Ibough H., El Behari F., Bouabdelli M., Souhel A. & Youbi N. 2001. L'accident Tizal-Azourki: Haut Atlas central (Maroc). Manifestations synsédimentaires liasiques en extension et conséquence du serrage atlasique. *Estudios Geologicos*, 57, 1-2, 15-30.
- Ibough H. 2004. *Du rift avorté au bassin sur décrochement, contrôles tectonique et sédimentaire pendant le Jurassique (Haut-Atlas central, Maroc)*. Thèse d'état Es-Sciences. Université Cadi Ayyad, Marrakech, 224 p.
- Jossen J.A. & Filali Moutei J. 1988. Bassin d'Ouarzazate, synthèse stratigraphique et structurale. Contribution à l'étude des aquifères profonds – Projet PNUD – DRPE (Direction de la Recherche et de la planification de l'Eau) MOR /86/004-Exploration des eaux profondes. Rapp. Inédit., 38 p., 1 carte, 3 coupes.
- Laville E., Lesage J.L. & Seguret M. 1977. Géométrie, cinématique (dynamique) de la tectonique atlasique sur le versant sud du Haut Atlas marocain, aperçu sur la tectonique hercynienne et tardi-hercynienne. *Bull. Soc. géol. France*, (7), XIX, 3, 527-539.
- Laville E. 1980. Tectonique et microtectonique d'une partie du versant sud du Haut Atlas marocain (Boutonnière de Skoura, Nappe de Toundout). *Notes & Mém. Serv. géol. Maroc*. 285. 81-183.
- Michard A. 1976. Eléments de géologie marocaine. *Notes & Mém. Serv. géol. Maroc*, 252, 408 p.
- Notes & Mém. Serv. Geol. Maroc, 1959, n°70: Carte géologique du Maroc, Feuille d'Ouarzazate 1/500000^{ème}.
- Reichert B., Thein J., Cappy S., Stichler W. & Agoussine M. 2003. Hydrogeological framework of the northern Drâa-catchment, Morocco: Results of local and regional scale investigations. *Int. Symp. Isotope Hydrol. & Integrated Water Resources Management*, Vienna, 19-23 may.
- Zylka R. & Jacobshagen V. 1986. Zur strukturell Entwicklung am Südrand des zentralen Hohen Atlas (Morokko). *Berliner geowis. Abh.*, A, 66, 415-432.

Manuscrit soumis le 25 juin 2004

Version modifiée acceptée le 30 novembre 2004