

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable

Structure de Recherche : Géosciences, Eau et Environnement

Discipline : Sciences de la Terre

Spécialité : Géosciences et Environnement

Présentée et soutenue le 07/03/2020 par :

Youssef EL KAYSSI

**Caractérisation hydrogéologique des nappes de montagnes des hauts bassins
de Ziz et Rhéris
(Haut Atlas central du Maroc)**

JURY

Saida NIAZI	PES, FSR, Université Mohammed V-Rabat	Présidente
Ilias KACIMI	PES, FSR, Université Mohammed V-Rabat	Directeur de Thèse
Mohamed HILALI	PH, FST Errachidia, Université Moulay Ismail	Co-Directeur de thèse
Moad MORARECH	PH, FS Tétouan, Université Abdelmalek Essaadi	Rapporteur/ Examineur
Tarik BAHAJ	PH, FSR, Université Mohammed V-Rabat	Rapporteur/ Examineur
Jamal CHAO	PES, FS Kénitra, Université Ibn Tofail	Examineur
Mohamed SAADI	PH, FSR, Université Mohammed V-Rabat	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Dédicace

Je dédie ce travail de thèse à :

Ma mère pour son amour et son dévouement,

Mon épouse, à mes enfants Abderrahmane et Bayan pour leur affection et leur patience,

Mes frères, sœurs, leurs enfants et leurs conjoints pour leur encouragement,

Ma grande famille pour son soutien,

Mes amis pour leur solidarité,

À la mémoire de mon père Abderrahmane El Kayssi,

A la mémoire du grand Homme qui a tant sacrifié pour nous,

Celui qui m'avait aidé à découvrir le savoir le trésor inépuisable,

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour toi.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Géosciences, Eau et Environnement (LG2E) de la Faculté des sciences de Rabat-Agdal, sous la direction de Monsieur **Ilias KACIMI**, Professeur de l'Enseignement Supérieur et la codirection de Monsieur **Mohamed HILALI**, Professeur Habilité de l'Equipe de Génie des Mines, de l'Eau et de l'Environnement à la Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia.

Avant tout développement de cette thèse, il apparaît opportun de commencer ce travail, par des remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de cette recherche, ceux pour qui j'éprouve un grand respect et une grande gratitude pour leurs apports considérables.

Je suis très reconnaissant envers mon directeur de thèse **Ilias KACIMI**, Professeur de l'Enseignement Supérieur, d'abord de m'avoir fait confiance en tant que doctorant et pour avoir suivi de très près ce travail. Je le remercie amplement pour ces précieux conseils, ses encouragements continus et aussi pour ces remarques critiques et constructives qui ont abouti au bon déroulement de ce doctorat. Je le remercie pour son soutien moral, ses relectures et ses conseils pertinents quant à l'organisation du manuscrit, sa collaboration, fructueuse et essentielle à l'élaboration des articles. Je lui exprime ma gratitude et mes respectueux remerciements, pour son aide précieuse et sa patience durant les corrections de cette thèse.

Bien entendu, je n'aurais également pas pu réaliser cette thèse sans mon co-directeur de thèse **Mohamed HILALI**, Professeur Habilité qui, m'a toujours épaulé, conseillé, encouragé pour avancer sur ma recherche et aussi pour m'avoir encadré tout au long de ces années. Mes vifs remerciements lui sont adressés pour avoir accepté de codiriger ce travail.

Madame **Saïda NIAZI**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la faculté des sciences de Rabat. Je la remercie vivement de m'avoir fait l'honneur d'être présidente du jury.

Je remercie très chaleureusement le Professeur **Moad MORARECH**, Professeur Habilité à la faculté des sciences de Tétouan pour ses encouragements, ses conseils, ses qualités humaines et son aide amicale. C'est pour moi un honneur de le voir parmi mon jury de thèse en tant que rapporteur.

Mes remerciements vont tout particulièrement au Professeur **Tarik BAHAJ**, Professeur Habilité à la faculté des sciences de Rabat pour son aide précieuse au cours de la correction de cette thèse et pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en tant que rapporteur.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur **Jamal CHAO**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la faculté des sciences de Kénitra d'avoir accepté de juger ce travail en tant qu'examineur. Je suis honoré de sa présence parmi les membres de jury de cette thèse.

Je remercie bien vivement Monsieur le Professeur **Mohamed SAADI**, Professeur Habilité à la faculté des sciences de Rabat qui a bien voulu me faire l'honneur d'être examinateur de ce mémoire. Je lui exprime ma sincère reconnaissance.

Faisant partie de la Faculté des Sciences de Rabat, je tiens à remercier chaleureusement tous les professeurs du département de la géologie pour leur soutien au cours de mes études du Master.

Merci à Madame **Christine LEGER**, directrice de la société Phénixa qui sait donner le goût du challenge et du travail bien fait.

Je tiens à remercier les techniciens et ingénieurs de l'Agence du Bassin du Guir-Ziz-Rhéris, sans lesquels il aurait été difficile de mener à bien cette thèse. Je remercie vivement Monsieur le Directeur **Abderrahman MAHBOUB** pour son grand aide d'avoir les données nécessaires pour ce mémoire.

Enfin, je tiens à saluer toute personne qui de près ou de loin ayant généreusement contribué à l'élaboration de ce travail.

Résumé

Le haut Atlas central, considéré comme un des châteaux d'eau du Maroc a connu au cours des dernières années une sécheresse prolongée, qui s'est traduite par un assèchement des puits superficiels et un tarissement de certaines sources. Une étude géo-structurale et hydrogéologique approfondie s'avère donc très utile, surtout quand il s'agit d'une zone très accidentée et peu connue. Au total, la zone renferme 3 complexes aquifères profonds (Lias inférieur-Domérien, Aalénien-Bajocien et Bajocien-Bathonien), subdivisés en 15 unités hydrogéologiques, sous forme des panneaux effondrés. L'analyse de la piézométrie montre un écoulement de direction N-S dans le Lias inférieur-Domérien, dans les autres unités, il prend des directions variables selon l'inclinaison des panneaux aquifères et la position des zones de recharge. L'étude des bilans montre que ces nappes profondes sont en équilibre hydrique. La modélisation hydrodynamique de la nappe superficielle de Rich sous GMS a montrée une hétérogénéité importante en terme de perméabilité (de 10^{-3} à 10^{-5} m/s), des porosités efficaces comprises entre 5% et 25% et des bilans relativement équilibrés. L'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de cette nappe selon DRASTIC et PRK montre une vulnérabilité généralement moyenne.

MOTS-CLÉS: Haut Atlas, Bassins du haut Ziz-Rhéris, Hydrogéologie, modélisation, Vulnérabilité.

Abstract

The central High Atlas of Morocco knew in the last years a prolonged drought, which allowed the drying-out of water wells and some water sources. A detailed geostructural and hydrogeological study then becomes very useful, especially for this area which is very rugged and little recognized. In total, the area contains 3 aquifer complexes (Lower Lias- Domerian, Aalenian-Bajocian and Bajocian- Bathonian) subdivided into 15 hydrogeological. Their most likely geometry is in the form of collapsed panels. The analysis of the piezometry shows a general flow N-S in the lower Lias-Domerian, in the other units, it takes variable directions according to the general inclination of the aquifer panels and the position of the recharge areas. The estimation of groundwater budgets showed that the deep aquifers are relatively balanced. The hydrodynamic modeling developed for the Rich alluvial aquifer shown a significant heterogeneity in terms of permeability (from 10^{-3} to 10^{-5} m/s), effective porosities between 5% and 25% and relatively balanced budgets. The assessment of vulnerability to pollution according to DRASTIC and PRK models shows that the Rich aquifer has a generally medium vulnerability.

KEYWORDS: High Atlas, Upper Ziz-Rhéris basins, Hydrogeology, hydrodynamic modeling, Vulnerability.

SOMMAIRE

Dédicace	2
Remerciements	3
Résumé.....	4
Abstract	5
Introduction générale	13
Chapitre 1. Présentation de la zone d'étude	20
1.1 Situation géographique.....	20
1.2 Cadre administratif.....	21
1.3 Population.....	21
1.4 Activités socio-économiques	22
1.4.1 Agriculture et périmètres irrigués	22
1.4.2 Tourisme	23
1.4.3 Artisanat.....	24
1.4.4 Activités minières.....	24
1.4.5 Infrastructure routière.....	24
Chapitre 2. Cadre géologique et structural	26
2.1 Synthèse des travaux antérieurs	26
2.1.1 La série du Lias inférieur – Domérien	31
2.1.2 La série Aalénien – Dogger	33
2.1.3 Les formations retenues renfermant des réservoirs aquifères	34
2.2 Apports de la géophysique et des sondages mécaniques et schéma conceptuel.....	35
2.2.1 Les sondages et forages mécaniques	35
2.2.2 Campagnes géophysiques	36
2.2.3 Difficultés rencontrées	38
2.2.4 Schéma géologique conceptuel.....	41
2.3 Cartographie des accidents régionaux	45
2.3.1 Méthodologie de traitement	47
2.3.2 Extraction et validation des linéaments	51
2.3.3 Interprétation.....	53
2.4 Conclusion	54
Chapitre 3. Hydro-climatologie et évaluation des apports en eaux de surface.....	56
3.1 Introduction	56
3.2 Analyse climatologique et évaluation de la pluie efficace.....	57
3.2.1 Analyse des précipitations	57
3.2.2 Analyse des températures et diagramme ombrothermique	60
3.2.3 Analyse de l'évaporation	62
3.3 Analyse hydrologique et régime des cours d'eau	63
3.3.1 Introduction	63
3.3.2 Présentation des cours d'eau et des bassins versants	63
3.3.3 Régime hydrologique des cours d'eau.....	66
3.3.4 Régime des sources.....	69
3.4 Evaluation des apports en eaux de surface.....	70
3.4.1 Méthodologie.....	70
3.5 Conclusion	78
Chapitre 4. Caractérisation hydrogéologique des systèmes aquifères profonds	79
4.1 Extension et géométrie des réservoirs aquifères profonds	79
4.1.1 Méthodologie et principe.....	79
4.1.2 Système aquifère du Lias inférieur – Domérien.....	81
4.1.3 Systèmes aquifères de l'Aalénien-Bajocien	84
4.1.4 Systèmes aquifères du Bajocien-Bathonien.....	95

4.2	Piézométrie des nappes.....	102
4.2.1	Méthodologie	102
4.2.2	Données piézométriques disponibles.....	103
4.2.3	Piézométrie de la nappe du Lias inférieur-Domérien.....	104
4.2.4	Piézométrie des nappes de l'Aaléno-Bajocien.....	110
4.2.5	Piézométrie des nappes du Bajocien-Bathonien.....	114
4.3	Caractérisation hydrodynamique des systèmes aquifères.....	119
4.3.1	Choix de la méthode d'interprétation	119
4.3.2	Estimation de la transmissivité à partir des débits spécifiques.....	120
4.3.3	Estimation de la transmissivité à partir des données des essais de pompage.....	122
4.4	Evaluation des bilans des nappes	131
4.4.1	Système aquifère du Lias inférieur – Domérien.....	131
4.4.2	Système aquifère de l'Aaléno-Bajocien.....	135
4.4.3	Système aquifère du Bajocien – Bathonien.....	140
4.5	Conclusion	148
Chapitre 5.	Caractérisation hydrogéologique des systèmes aquifères superficiels.....	152
5.1	Introduction	152
5.2	Géométrie, lithologie et piézométrie.....	153
5.3	Modélisation hydrodynamique en régime permanent	156
5.3.1	Introduction	156
5.3.2	Logiciel de modélisation et équations d'écoulement	156
5.3.3	Modèle conceptuel.....	158
5.3.4	Préparation des données du modèle	161
5.3.5	Résultats et discussions	164
5.4	Modélisation hydrodynamique en régime transitoire.....	167
5.4.1	Matériel et méthodes.....	168
5.4.2	Résultats et discussions	173
5.5	Cartographie de la vulnérabilité à la pollution.....	177
5.5.1	Introduction	177
5.5.2	Matériels et méthodes	177
5.5.3	Résultats et discussions	188
5.6	Conclusion	194
	Conclusion générale et perspectives.....	196
	Bibliographie.....	200

TABLEAUX

Tableau 1. Répartition de la population par province (RGPH 2014 –HCP).....	21
Tableau 2. Valeurs de résistivité des niveaux résistants et conducteurs (LPEE, 1993).	37
Tableau 3. Caractéristiques des images Landsat ETM+ utilisées (LIMA image provided at the http://www.lima.usgs.gov web site, consulté le 13/09/2016)	46
Tableau 4. Matrice de corrélation des bandes brutes Landsat ETM+ de 2001	48
Tableau 5. Filtre directionnel (3x3) de Sobel	50
Tableau 6. Stations climatiques exploitées et type de données disponibles (DMN, 2011)	56
Tableau 7. Températures moyennes enregistrées dans la zone d'étude (DMN, 2011)	61
Tableau 8. Caractéristiques physiques des sous bassins du Haut Ziz et Rhéris	65
Tableau 9. Hauts bassins de Ziz et Rhéris – Caractéristiques des débits instantanés des sources jaugées (l/s).....	70
Tableau 10. Besoins en eau par culture (ORMVAT, 2015)	73
Tableau 11. Apports naturels des sous bassins versants jaugés des haut Ziz et Rhéris	76
Tableau 12. Débits spécifiques calculés des sous bassins jaugés des hauts Ziz et Rhéris	77
Tableau 13. Coefficient de ruissellement des stations hydrologiques des hauts Ziz et Rhéris	77
Tableau 14. Nomenclature et extensions des autres unités hydrogéologiques du Bajocien-Bathonien des hauts bassins de Ziz et Rhéris.....	101
Tableau 15. Réseaux de suivi et chroniques piézométriques disponibles au niveau de la zone d'étude	103

Tableau 16. Réseau de suivi de la piézométrie de la nappe de Lias inférieur-Domérien (ABHGZR, 2012).....	104
Tableau 17. Amplitudes et intervalles de variations piézométriques du Lias inférieur-Domérien dans le secteur de Guers Tiaallaline (ABHGZR, 2012).....	110
Tableau 18. Réseau de suivi piézométrique des nappes aaléniennes (ABHGZR, 2012)	110
Tableau 19. Réseau de suivi de la piézométrie des nappes du Bajocien-Bathonien	115
Tableau 20. Caractéristiques des essais de pompages disponibles	123
Tableau 21. Sources captant le Lias inférieur – Domérien dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris.....	134
Tableau 22. Bilan global du système Lias inférieur – Domérien	135
Tableau 23. Apport des eaux d’infiltration pluviales des unités Aaléno-Bajociennes – Hauts bassins de Ziz et Rhéris.....	137
Tableau 24. Apports des infiltrations dans les lits des cours d’eau dans les unités Aaléno-Bajociennes – Hauts bassins de Ziz et Rhéris).....	137
Tableau 25. Sources captant les réservoirs de l’Aaléno-Bajocien dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris.....	138
Tableau 26. Ouvrages ONEP et volumes d’eaux prélevées dans les nappes Aaléno-Bajociennes des hauts Ziz et Rhéris.....	139
Tableau 27. Bilan global du système Aaléno-Bajocien des hauts Ziz et Rhéris	139
Tableau 28. Apport des eaux d’infiltration dans les unités du Bajocien-Bathonien – hauts bassins de Ziz et Rhéris.....	140
Tableau 29. Apports des infiltrations dans les lits des cours d’eau (unités du Bajocien-Bathonien)	142
Tableau 30. Retours d’irrigation dans les unités hydrogéologiques du Bajocien-Bathonien – Hauts bassins de Ziz et Rhéris.....	142
Tableau 31. Sources captant les unités du Bajocien-Bathonien des hauts bassins de Ziz et Rhéris (ABHGZR, 2012).....	143
Tableau 32. Volumes prélevés des eaux souterraines par commune (ABHGZR, 2012).....	144
Tableau 33. Ratios moyens des régimes de pompage et des installations des échantillons retenus (ORMVAT, 2015).....	146
Tableau 34. Volumes d’eau prélevés pour l’irrigation dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris.....	147
Tableau 35. Bilan global du système Bajocien – Bathonien des hauts bassins de Ziz et Rhéris	147
Tableau 36. Conductivités hydrauliques correspondantes aux faciès lithologiques selon De Marsily (1981)	162
Tableau 37. Bilan hydrique calculé en régime permanent	167
Tableau 38. Extrait des porosités moyennes des principaux réservoirs aquifères (Detay, 1993 ; Castany, 1998)	170
Tableau 39. Recharge et moyennes pluviométriques par périodes de simulation	170
Tableau 40. Débits en m ³ /j sur les forages gérés par l’Office National de l’Eau Potable	171
Tableau 41. Points de surveillance choisis pour le calage du modèle en régime transitoire	172
Tableau 42. Bilan hydrique de la nappe alluviale de Rich en régime transitoire	176
Tableau 43. Scores et poids des paramètres DRASTIC (Aller et al., 1987).....	180
Tableau 44. Critères d’évaluation de la vulnérabilité DRASTIC (Aller et al., 1987)	181
Tableau 45. Échelle d’interprétation de Kappa K (Bernard, 1993)	188
Tableau 46. Coïncidence entre les indices de vulnérabilités DRASTIC et PRK et les conductivités électriques	188

FIGURES

Figure 1 : Méthodologie générale de l’étude des aquifères profondes.....	18
Figure 2 : Méthodologie générale de l’étude des aquifères superficielles	19
Figure 3 : Situation géographique de la zone d’étude	20
Figure 4 : Répartition de la superficie des hauts bassins de Ziz et Rhéris par province	21
Figure 5 : Situation du périmètre de moyen hydraulique des hauts bassins de Ziz et Rhéris (ORMVAH, 2017).....	23
Figure 6 : Réseau routier dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris (METLE, 2018).....	25
Figure 7 : Géologie de la zone d’étude (extraits des feuilles géologiques de du Haut Atlas au Nord de Ksar Es-Souk et de Boudenib au 200ème)	29
Figure 8 : Coupe géologique AB de la Figure 7, traversant la zone d’étude (M. COMBE, 1977, modifiée)	29
Figure 9 : Coupe stratigraphique synthétique, généralisée à l’échelle de la chaîne du haut Atlas, montrant les différentes formations rencontrées (Beauchamp et al., 1999 ; modifié).....	30

Figure 10 : Subdivision des unités géologiques du Lias du Haut Atlas central (Studer, 1980 ; modifié)	32
Figure 11 : Coupe stratigraphique type dans l'axe du Haut Atlas, au droit de la vallée de Ziz ; Schéma du Dresnay (1966), modifié par Michard (1976) ; schéma légèrement modifié et complété	34
Figure 12 : Situation géographique des forages et sondages mécaniques et géo-électriques (LPEE, 1993 ; DGH, 1996 ; ONEP, 2002 ; ABHGZR, 2012)	36
Figure 13 : Exemple de difficultés d'interprétation de la géophysique dans le Haut Atlas central (coupe géo-électrique RG IV)	40
Figure 14 : Coupe interprétative dans la région de Foug Zaabel montrant le changement de faciès et d'épaisseur des blocs basculés d'âge liasique (d'après A. El Kochri, 1996 ; modifiée).	43
Figure 15 : Stratigraphie simplifiée montrant des variations de faciès et d'épaisseurs de la bordure sud vers le centre du Haut Atlas (d'après Du Dresnay, 1979, modifiée).	44
Figure 16 : Modèle retenu de décrochement à bassins losangiques (Laville, 1985-1988).	45
Figure 17 : Images Landsat ETM+, en vraies couleurs 321, couvrant la zone d'étude (http://www.lima.usgs.gov web site, consulté le 13/09/2016)	46
Figure 18 : Organigramme de traitement de l'image satellitaire Landsat ETM+	47
Figure 19 : Image CP1 issue du traitement de l'image ETM+ - Hauts bassins de Ziz et Rhéris	49
Figure 20 : Image CP1 couvrant la zone d'étude avec les filtres de direction E-O, N-S, NO-SE, NE-SO rehaussant respectivement les accidents N-S, E-O, NE-SO et NO-SE	51
Figure 21 : Carte des linéaments majeurs issus du traitement de l'image Landsat ETM+ rehaussée – Hauts bassins de Ziz et Rhéris.	52
Figure 22 : Densité des linéaments issus du traitement d'image Landsat ETM+ rehaussée – Hauts bassins de Ziz et Rhéris.	53
Figure 23 : Extraction des jours pluvieux à l'échelle annuelle, station M'Zizel 1982-2009 (DMN, 2011).	57
Figure 24 : Histogrammes des pluies moyennes mensuelles des hauts bassins de Ziz et Rhéris (DMN, 2011)	58
Figure 25 : Evolution de la précipitation annuelle aux stations de Foug Tillicht (a) et d'Ait Bouijane (b), (DMN, 2011)	59
Figure 26 : Evolution spatiale des précipitations annuelles dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris (DMN, 2011).	60
Figure 27 : Diagrammes ombrothermiques de Foug Zaabel et d'Ait Bouijane	61
Figure 28 : Répartition annuelle de l'évaporation en mm dans la zone d'étude (DMN, 2011)	62
Figure 29 : Sous bassins versants du haut Ziz et Rhéris	64
Figure 30 : Débits moyens mensuels observés dans la zone d'étude (ABHGZR, 2011).	66
Figure 31 : Débits moyens mensuels interannuels des stations amonts (ABHGZR, 2011).	67
Figure 32 : Débits moyens mensuels interannuels des stations avals (ABHGZR, 2011)	67
Figure 33 : Débits moyens mensuels des principaux cours d'eau de la zone d'étude d'après leur fréquence de dépassement (ABHGZR, 2011)	68
Figure 34 : Situation des sources inventoriées dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris.	69
Figure 35 : Evolution interannuelle des débits des sources de Zaouiat Sidi Hamza et des gorges	70
Figure 36 : Assolements pratiqués dans les sous bassins du haut Ziz (ORMVAT, 2015).	72
Figure 37 : Prélèvements nets d'irrigation dans les sous bassins des hauts Ziz et Rhéris	74
Figure 38 : Apports des sources des sous bassins des hauts Ziz et Rhéris	75
Figure 39 : Aires d'affleurement du complexe Lias inférieur - Domérien	80
Figure 40 : Aires d'affleurement du complexe Lias inférieur - Domérien	81
Figure 41 : Isohypses du toit du Lias inférieur – Domérien (mNgm)	83
Figure 42 : Profondeur du toit du complexe Lias inférieur – Domérien (m/sol)	83
Figure 43 : Extensions des unités hydrogéologiques Aaléno-Bajociens	84
Figure 44 : Coupe géologique traversant l'unité de « Griyet » du complexe Aaléno-Bajocien.	85
Figure 45 : Coupe géologique traversant l'unité « d'En-Nzala – Tazrouft » du complexe Aaléno-Bajocien.	86
Figure 46 : Coupes géo-électriques traversant l'unité « Amgour – Tighattane » du complexe Aaléno-Bajocien.	88
Figure 47 : Coupe géologique traversant l'unité « Assoul – Ait Hani » du complexe Aaléno-Bajocien	90
Figure 48 : Coupes géo-électriques traversant l'unité « Igli – Rich » du complexe Aaléno-Bajocien	92
Figure 49 : Coupe géologique traversant l'unité « Igli – Rich » du complexe Aaléno-Bajocien	93
Figure 50 : Isohypses du toit des unités Aaléno-Bajociennes en mètre NGM	94
Figure 51 : Extensions des unités hydrogéologiques du complexe Bajocien-Bathonien.	95
Figure 52 : Coupe géologique traversant l'unité de « Mititaoute » du complexe Bajocien-Bathonien	96

Figure 53 : Coupe géologique traversant l'unité de « d'Assamar Nighermane » du complexe Bajocien-Bathonien	97
Figure 54 : Coupe géologique n°1 traversant l'unité « Tamdart – Tamagourt » du complexe Bajocien-Bathonien	99
Figure 55 : Coupe géologique n°2 traversant l'unité « Tamdart – Tamagourt » du complexe Bajocien-Bathonien	99
Figure 56 : Coupe géologique n°3 traversant l'unité « Tamdart – Tamagourt » du complexe Bajocien-Bathonien	99
Figure 57 : Coupe géologique n°4 traversant l'unité « Tamdart – Tamagourt » du complexe Bajocien-Bathonien	100
Figure 58 : Coupe géologique traversant l'unité « Taghzout – Tamtatoucht », du complexe Bajocien-Bathonien	100
Figure 59 : Coupe géologique traversant l'unité « d'Oumlil » du complexe Aalénien-Bajocien.....	101
Figure 60 : Carte piézométrique du Lias inférieur – Domérien des hauts bassins de Ziz et Réris.....	105
Figure 61 : Piézométrie du Lias inférieur - Domérien – Zone 1 de la Figure 60.....	107
Figure 62 : Piézométrie du Lias inférieur - Domérien – Zone 2 de la Figure 60.....	108
Figure 63 : piézométrie du Lias inférieur - Domérien – Zone 3 de la Figure 60.....	109
Figure 64 : Evolution piézométrique du Lias inférieur-Domérien dans le secteur de Guers Tiaallaline (ABHGZR, 2012).....	109
Figure 65 : Carte piézométrique des nappes Aaléno-Bajociennes	111
Figure 66 : Piézométrie de l'unité Aaléno-Bajocienne « Igli-Rich », Zone 1 de la Figure 65.....	112
Figure 67 : Piézométrie de l'unité Aaléno-Bajocienne « Assoul-Ait Hani », Zone 2 de la Figure 65	113
Figure 68 : Evolution piézométrique dans la nappe Aaléno-Bajocienne d' Igli – Rich	114
Figure 69 : Carte piézométrique des nappes du Bajocien-Bathonien.....	115
Figure 70 : Piézométrie de l'unité Mititaoute du Bajocien-Bathonien, Zone 1 de la Figure 69	116
Figure 71 : Piézométrie de l'unité Taghzout-Tamtatoucht du Bajocien-Bathonien – Zone 2 de la Figure 69	117
Figure 72 : Piézométrie de l'unité Taghzout-Tamtatoucht du Bajocien-Bathonien – Zone 3 de la Figure 69	118
Figure 73 : Evolution piézométrique au niveau du piézomètre 918/39.....	118
Figure 74 : Transmissivités des nappes Aaléno-Bajociennes et du Lias inférieur-Domérien, obtenues par la formule du Dupuits.....	121
Figure 75 : Transmissivités des nappes du Bajocien-Bathonien obtenues par la formule du Dupuits	121
Figure 76 : Courbes représentatives des forages d'essais du complexe Aaléno-Bajocien.....	126
Figure 77 : Courbes représentatives des forages d'essais du complexe Bajocien-Bathonien	130
Figure 78 : Distribution spatiale de la lame d'eau infiltrée sur les aires d'affleurement du Lias inférieur-Domérien – Hauts bassins de Ziz et Réris.....	132
Figure 79 : Distribution spatiale des lames d'eaux infiltrées sur les systèmes aquifères Aaléno-Bajociens – Hauts bassins de Ziz et Réris	136
Figure 80 : Distribution spatiale de lames d'eaux infiltrées sur les unités aquifères du Bajocien-Bathonien	141
Figure 81 : méthodologie de calcul des ratios moyens relatifs au régime de pompage destiné aux nappes du Bajocien-Bathonien	145
Figure 82 : Corrélations entre les volumes d'eau prélevés et les superficies.....	146
Figure 83 : Transmissivités moyennes dans les unités de l'Aaléno-Bajocien.....	149
Figure 84 : Transmissivités moyennes dans les unités du Bajocien-Bathonien	149
Figure 85 : Bilan global du Lias inférieur-Domérien des hauts bassins de Ziz et Rhéris	150
Figure 86 : Bilans détaillés des unités aquifères de l'Aaléno-Bajocien des hauts Ziz et Rhéris	151
Figure 87 : Bilans détaillés des unités aquifères du Bajocien-Bathonien des hauts Ziz et Rhéris	151
Figure 88 : Situation de la nappe de Rich.....	153
Figure 89 : Relations géologique et structurale entre la nappe alluviale de Rich et les formations géologiques profondes (Margat, 1952, modifié).....	154
Figure 90 : Coupe géologique de la Figure 89.....	155
Figure 91 : Isohypes du mur de la nappe de Rich.....	155
Figure 92 : Discrétisation du domaine d'étude avec emplacement de deux coupes N-S et E-O	160
Figure 93 : Coupes N-S et E-O de la Figure 92, extraites du domaine discrétisé.....	160
Figure 94 : Piézométrie de référence de la nappe de Rich, Etat de 1980	161
Figure 95 : Isohypes du toit (a) et du substratum (b) de la nappe de Rich	162
Figure 96 : Carte des perméabilités calculées à l'issu du modèle (m/s).....	165

Figure 97 : Comparaison entre la piézométrie calculée et celle observée	166
Figure 98 : Corrélation entre la piézométrie calculée et mesurée en régime permanent	166
Figure 99 : Discretisation du domaine modélisé et conditions aux limites de la nappe du Rich	168
Figure 100 : Situation des captages ONEP dans la nappe de Rich.....	171
Figure 101 : Situation du réseau de surveillance de la nappe de Rich.....	172
Figure 102 : Comparaison des niveaux piézométriques mesurés et calculés dans quelques puits témoins.....	173
Figure 103 : Répartition de la porosité efficace issue du calage	174
Figure 104 : Comparaison des niveaux piézométriques simulés (état de référence 1980 et état de 2008)	175
Figure 105 : Comparaison des niveaux piézométriques et des débits de la source de Sidi Hamza	175
Figure 106 : Occupation du sol de la zone d'étude (Lambert Maroc Zone I)	178
Figure 107 : Conductivité électrique de la nappe de Rich (Lambert Maroc Zone I).....	179
Figure 108 : Profondeur du plan d'eau de la nappe de Rich.....	182
Figure 109 : Recharge nette (R) de la nappe de Rich.....	183
Figure 110 : Carte de la zone saturée (I) de la nappe de Rich	184
Figure 111 : Carte du milieu aquifère (A) de la nappe de Rich.....	184
Figure 112 : Carte du type de sol (S) de la nappe de Rich.....	185
Figure 113 : Carte de la Topographie (T) de la nappe de Rich.....	186
Figure 114 : Carte de la conductivité hydraulique « C » de la nappe de Rich	187
Figure 115 : Carte de vulnérabilité DRASTIC standard de la nappe de Rich, classification de (Aller et al., 1987).....	190

PHOTOGRAPHIES

Photo 1 : Segua de dérivation et PMH de Ziz.....	23
Photo 2 : Epaissement de Foun Zaabel en éventail et biseautage des dépôts sinémuriens-pliensbachiens (S. Sarih, 2007).....	43

ANNEXES

Annexe 1. Débits annuels observés des stations hydrologiques des hauts bassins de Ziz et Rhéris (m ³ /s)
Annexe 2. Les superficies des PMH des sous-bassins du Haut Ziz
Annexe 3. Les superficies des PMH des sous bassins du Haut Rhéris
Annexe 4. Calcul des prélèvements nets en amont des sous bassins des hauts Ziz et Rhéris
Annexe 5. Côtes et profondeurs du toit du Lias inf-Domérien – Traitement des SE
Annexe 6. Caractéristiques des forages d'essais et transmissivités obtenues par la formule de Dupuits
Annexe 7. Coupes lithologiques des forages d'eau et d'essais

Liste des abréviations

A.V.I	Aquifer Vulnerability Index	N-E	Nord-Est
ABHZGR	Agence du bassin hydraulique de Ziz-Guir-Rhéris	N-N-O	Nord-Nord-Ouest
ACP	Analyse en Composantes Principales	N-O	Nord-Ouest
AEP	Alimentation en eau potable	NP	Niveau piézométrique
Alt moy	Altitude moyenne ;	N-S	Nord-Sud
B.H.A	Barrage Hassan Addakhil	NWWA	National Water Well Association
CE	Conductivité électrique	O.N.A	Omnium nord-africain
Cr	Coefficient de ruissellement	ONEP	Office national de l'eau potable
D	Diffusivité	ORMVAT	Office régional de mise en valeur agricole
div	Divergence	P	Périmètre
EPA	Environmental Protection Agency	P. moy	Pente moyenne
ETM	Enhanced Thematic Mapper	Pe	Pluie efficace
ETR	Evapotranspiration réelle	pH	Potentiel hydrogène
g	Poids volumique	PMH	Petite et Moyenne Hydraulique
GMEE	Equipe de Recherche de Génie des Mines, de l'Eau et de l'Environnement	Qmoy	Débit moyen
h	Heure	RGPH	Recensement général de la population et de l'habitat
ha	Hectare	RU	Réserve utile
HCP	Haut-commissariat au plan	S	Coefficient d'emmagasinement
IG	Indice de Graveluis ;	SBV	Sous bassin versant
inf	Inférieur	SE	Sondage électrique
IRE	Indice des ressources en eau	S-E	Sud-Est
km²	Kilomètre carré	SIG	Système d'Information Géographique
Kv	Perméabilité verticale	SMI	Société Métallurgique d'Imider
L.E	Longueur des écoulements	S-O	Sud-Ouest
l/s	Litre par seconde	SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
LG2E	Laboratoire de Géosciences, Eau et Environnement	SSE	Sud-Sud-Est
LPEE	Laboratoire public d'essais et d'études	T	Transmissivité
m/s	Mètre par seconde	TC.moy	Temps de concentration moyen
m²/s	Mètre carré par seconde	TN	Terrain naturel
m³/ha	Mètre cube par hectare	Tr	Transmissivité
m³/s	Mètre cube par seconde	U.S.E.P.A	Agence de Protection Environnementale Américaine
Max	Maximal	U.S.G.S	United States Geological Survey
Min	Minimal	Vc	Volumes prélevés
mm	Millimètre	Z (m)	Altitude en mètre
mm/an	Millimètre par an	%	Pourcent
Mm³	Million de mètre cube	°C	Degré celsius
MNA	Modèle numérique altitudinal mondial	µS/cm	Microsiemens par centimètre
N.W.W.A	National Water Well Association	‰	Pour mille

Introduction générale

L'eau et le changement climatique sont régulièrement cités parmi les crises les plus sévères que l'humanité aura à affronter lors des prochaines décennies. En réalité, les liens entre ces deux enjeux sont si étroits qu'il s'agit d'un seul et même défi. La Banque mondiale en 2016 a insisté sur la « redoutable menace » que constitue la raréfaction des ressources en eaux exacerbée par le changement climatique, sur la croissance économique et la stabilité dans le monde. Au point que certaines régions pourraient accuser un recul de leur PIB de l'ordre de 6 %.

Sous les effets combinés de la croissance démographique, de l'augmentation des revenus et l'expansion des villes et des périmètres irrigués, la demande en eau va connaître une hausse exponentielle, tandis que la ressource sera de plus en plus irrégulière et incertaine. Selon la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD), d'ici à 2025, 1,8 milliard de personnes vivront dans des pays ou des régions où la pénurie d'eau sera absolue et les deux tiers de la population mondiale (5,3 milliards de personnes) pourraient vivre dans des conditions de stress hydrique.

En comparaison avec l'état de 2019, les volumes d'eau disponibles dans les villes, pourraient chuter des deux tiers d'ici à 2050, en raison de la diminution des ressources en eaux et de la concurrence croissante entre les différents usages (BM, 2015). Dans les trois prochaines décennies, la demande en eau de l'agriculture pourrait, de fait, croître de 50 % et celle du secteur de l'énergie de 85 %, tandis que la hausse des besoins dans les villes pourrait atteindre jusqu'à 70 % (ONU, 2018).

Par sa situation géographique, le Maroc est caractérisé par un climat fortement contrasté ; à la fois méditerranéen au nord, et aride au sud et au sud-est de l'Atlas, avec un régime pluviométrique dominé par une forte irrégularité dans l'espace et dans le temps. Les apports en eau sont donc hétérogènes dans les différents bassins hydrauliques du pays, avec une faiblesse des apports en eaux superficielles, en plus du problème d'envasement des barrages qui réduit la capacité de stockage. Les changements climatiques induisent des sécheresses successives et des pluies torrentielles et les sols connaissent une dégradation importante due à l'érosion et l'appauvrissement. L'impact humain est, de son côté, particulièrement concerné, avec la pression exercée sur les eaux souterraines, accentuée par la prolifération des motopompes dont l'utilisation échappe à tout control. La détérioration de la qualité de l'eau

résultant de la contamination par les fertilisants et l'augmentation de la salinité des eaux souterraines achève d'assombrir le tableau. Tout ceci est pourtant pris en considération dans la loi 35-15 relative à l'eau, et qui aborde toutes les questions relatives à une bonne gouvernance de cette ressource. Malgré les textes de loi, la multitude des intervenants, des stratégies et des plans mis en place pour assurer une bonne gouvernance de l'eau, des faiblesses persistent encore.

Avec ces contraintes, l'orientation vers les nappes profonde devient maintenant une alternative et cela pour compenser le déficit observé dans les eaux superficielles et les nappes phréatiques. Plusieurs facteurs encouragent l'exploration des nappes profondes et les aquifères de montagne. Les principaux sont : La sécheresse qui sévit à travers tout le pays depuis plus de deux décennies, le développement des techniques de forage et la baisse de leurs coûts, ainsi que la généralisation d'accès à l'eau potable dans le monde rural.

Les études hydrogéologiques entamées depuis plusieurs décennies par les agences des bassins hydrauliques, ont permis d'avoir une connaissance préliminaire sur les potentialités en eau, et sur le mode de fonctionnement des principaux aquifères superficiels, notamment des plaines, qui en général se développent en milieu poreux tels des cas des nappes du Gharb, de Saiss, de Tadla, du Haouz et de Sous. En raison des caractéristiques topographiques et géologiques non complexes, les travaux de prospection et d'exploitation des eaux souterraines sur ces aquifères ont été menés en premier. En revanche, quand il s'agit des nappes profondes, les caractéristiques hydrogéologiques sont restées parfois très générales et souvent imprécises.

L'accumulation d'une information hydrogéologique relativement importante, justifie actuellement des études régionales, qui regroupent à la fois les zones montagneuses, et les plaines adjacentes avec lesquelles elles sont le plus souvent en liaison hydraulique. Les aquifères de montagne reçoivent plus d'apports météoriques que les plaines, et quand leur nature lithologique et de la fracturation le permettent, ils peuvent emmagasiner une bonne partie des apports. Ils constituent le plus souvent des parts importantes de l'alimentation des nappes des plaines, soit par ré-infiltration, soit par circulation souterraine. Ce cas est très fréquent dans les nappes bordières des chaînes atlasiques, notamment les nappes hautes atlasiques avec les nappes adjacentes.

Actuellement, les ressources en eau du Haut Atlas sont en cours de déstockage et de salinisation notamment les aquifères superficiels. Pour diminuer la pression sur les nappes superficielles, l'orientation vers les aquifères profonds reste une solution opportune qui

pourrait constituer une alternative pour combler en partie le déficit hydrique observé en surface.

Le Haut Atlas renferme de puissants réservoirs profonds qui contiennent d'importantes réserves d'eaux emmagasinées et exercent de ce fait une régularisation intra et extra Atlas ; Ces ressources sont faiblement utilisées dans le Haut Atlas lui-même, mais garantissent une fourniture en eau régularisée permettant d'irriguer des milliers d'hectares modernes dans la plaine de Tafilalt en aval. Cependant, la configuration géométrique et structurale de ces réservoirs aquifères reste mal connue malgré l'exploration géologique et hydrogéologique entreprise par les agences des bassins hydrauliques et par plusieurs chercheurs (Ambroggi, 1963 ; Dijon, 1969 ; Combe Et El Hebil, 1977).

La plupart des coupes des sondages, établies lors de la perforation au cours de décennies de travaux, par différents, géologues, sondeurs, ou techniciens successifs, ne présentent aucune unité, et sont rarement interprétées de façon précise en stratigraphie. De ce fait, elles offrent de nombreux risques d'erreurs d'interprétation. Si les résultats de ces études et travaux sont d'une grande importance, la non maîtrise de manière approfondie de la géométrie et la lithologie des systèmes aquifères, limite certaines interprétations des phénomènes déterminants pour la gestion de la ressource en eau dans la zone ; notamment l'identification des zones de drainage et de recharge préférentielles, la productivité, les bilans et les interactions avec les nappes bordières ; Une connaissance approfondie des caractéristiques géométriques, structurales et hydrogéologiques des aquifères des montagnes haut atlasiques se révélerait donc nécessaire. C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail de cette thèse.

Une méthodologie couplant des approches hydro-climatologique, géo-structurale, hydrogéologique, de modélisation mathématique et de la vulnérabilité à la pollution (Figure 1 et Figure 2) a été développée selon huit objectifs spécifiques:

Le premier objectif est consacré à l'établissement d'une base de données spécifique à la zone d'étude. Les différentes informations et données ont été intégrées et analysées par un système d'information géographique.

Le deuxième objectif consiste en une analyse pluvio-hydrométrique (Figure 1) pour caractériser le régime pluviométrique et hydrologique des différents bassins versants de la zone et pour évaluer les apports en eaux de surface.

Le troisième objectif est réservé à la conception d'un modèle hydro-stratigraphique de la zone (Figure 1). Elle repose sur l'interprétation des coupes lithologiques des forages mécaniques et

sondages géo-électriques disponibles et sur les affleurements observés sur les cartes géologiques. Elle intègre également les principaux traits structuraux extraits par analyse des images satellitaires. Ce modèle conceptuel prend en considération les différentes interfaces sédimentaires des principaux aquifères de la zone (Complexes du Lias inférieur – Domérien, de l'Aalénien-Bajocien et du Bajocien-Bathonien). Il s'agit dans cette analyse de présenter les différentes unités hydrogéologiques de la zone sous forme des cartes hydrogéologiques et des coupes hydro-stratigraphiques synthétiques.

Le quatrième objectif concerne en une analyse structurale approfondie (Figure 1). Afin de déterminer le rôle de la fracturation dans les écoulements souterrains, une analyse des images optiques devient nécessaire. Des analyses quantitatives du réseau de fractures semblent nécessaires afin de cartographier les fractures et les accidents régionaux et de déterminer leur rôle dans les écoulements souterrains.

Le cinquième objectif est l'étude de la piézométrie des nappes (Figure 1). Son analyse a été faite à partir des données d'enquêtes de terrain et du réseau de suivi. Ces sources d'information constituent un fond de connaissance hydrogéologique de grand intérêt ; elles permettent notamment de disposer des situations de références et des données sur l'évolution dans le temps des nappes. Dans le cadre de cette thèse, l'étude de la piézométrie des nappes porte sur la structure de l'écoulement, la profondeur de l'eau et l'artésianisme, les zones d'alimentation et de décharges, le régime des nappes et l'impact des pompages (notamment agricoles et d'AEPI) sur l'évolution des nappes. Un travail préalable a été consacré à l'identification des anomalies, à partir de la lecture des graphes piézométriques obtenus. Ces anomalies ont été traitées par suppression des valeurs anormales encadrées par des mesures cohérentes. Les zones ayant fait l'objet d'une esquisse piézométrique sont celles qui disposent suffisamment de points de mesures.

Le sixième objectif est consacré à l'étude hydrodynamique des nappes profondes (Figure 1). Afin de valider les résultats des analyses géologiques et de la fracturation des différents réservoirs aquifères identifiés, l'interprétation des données des essais de pompage devient nécessaire, et ce, pour évaluer la productivité des nappes correspondantes et leurs caractéristiques hydrodynamiques qui sont proportionnelles surtout par rapport à la nature de la roche saturée et de la complexité structurale du secteur. Les données disponibles sont synthétisées d'une manière sélective afin d'extraire indépendamment les propriétés hydrauliques de chaque niveau aquifère.

Le septième objectif est réservé au développement d'un modèle hydrodynamique dans les zones qui disposent suffisamment de données (Figure 1). La zone choisie est la nappe alluviale de Rich. Ce modèle mathématique est basé sur une synthèse hydrogéologique détaillée et il permettra de valider les paramètres hydrodynamiques spécifiques du système aquifère, de quantifier les débits naturels qui transitent par la nappe et de simuler leurs évolutions ainsi que l'évolution de la surface piézométrique correspondant.

Le huitième objectif a pour objet d'évaluer le degré de vulnérabilité de cette nappe superficielle (Figure 2) qui est la ressource la plus facilement exploitable dans la zone. La méthode DRASTIC bien reconnue à l'international a été utilisée pour cartographier les zones à risques et d'identifier les secteurs à hiérarchiser en termes de surveillance des eaux souterraines et d'occupation du sol.

L'ensemble de ces objectifs a été organisé selon les cinq chapitres:

Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude ;

Chapitre 2 : Cadre géologique et structural ;

Chapitre 3 : Hydro-climatologie et évaluation des apports en eaux de surface ;

Chapitre 4 : Caractérisation hydrogéologique des systèmes aquifères profonds ;

Chapitre 5 : Caractérisation hydrogéologique des systèmes aquifères superficiels ;

Conclusion générale et perspectives.

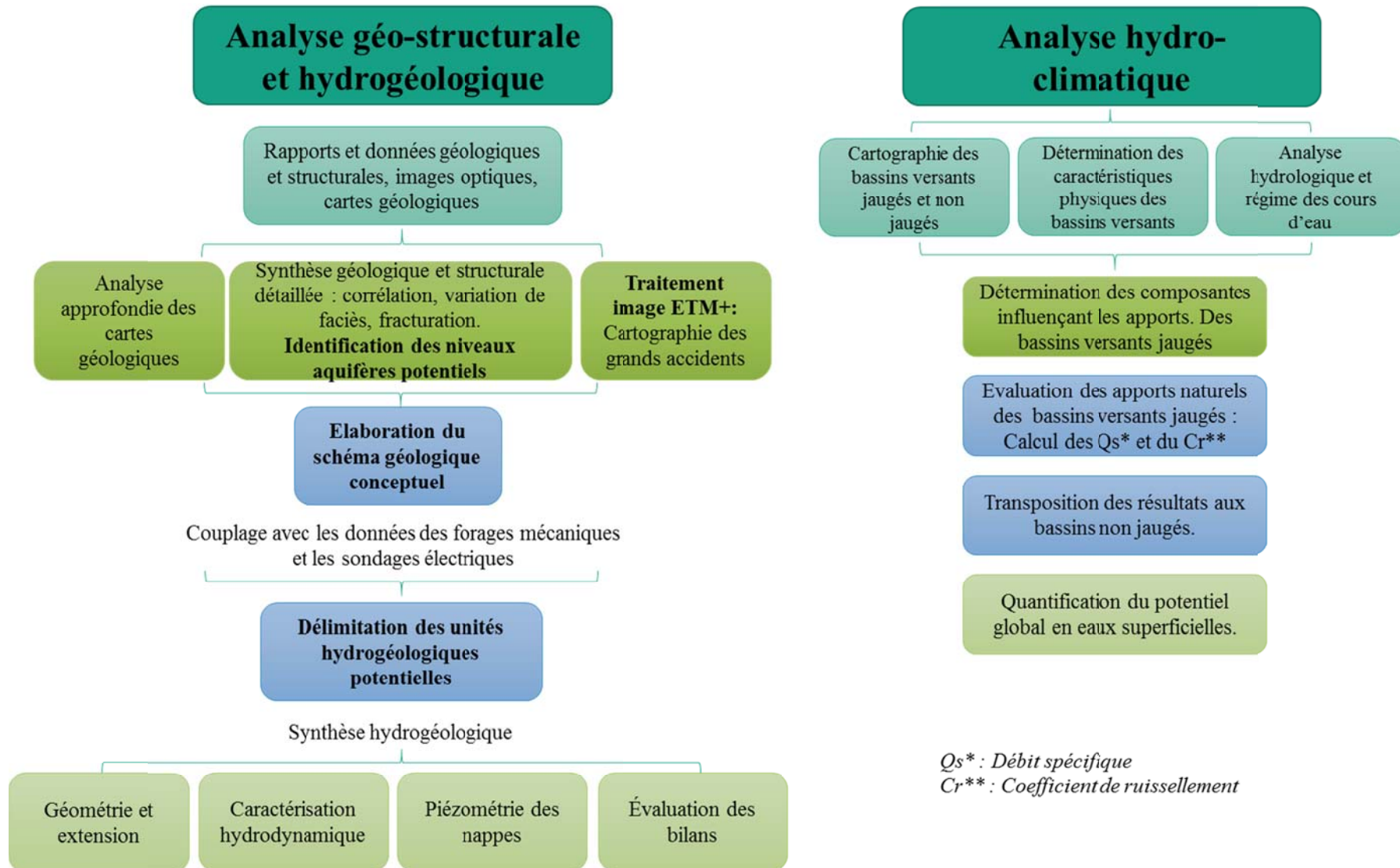


Figure 1 : Méthodologie générale de l'étude des aquifères profondes

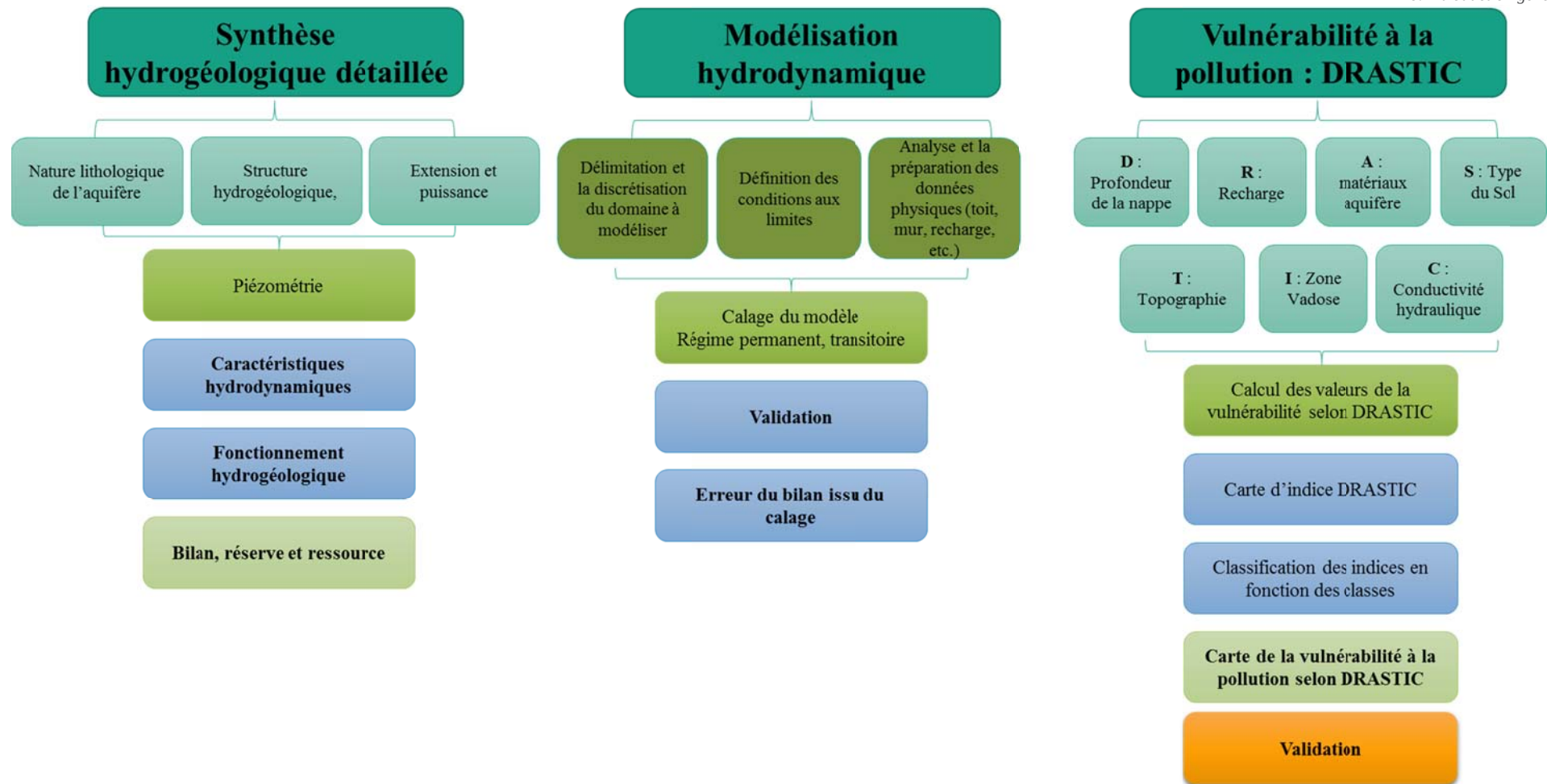


Figure 2 : Méthodologie générale de l'étude des aquifères superficielles

Chapitre 1. Présentation de la zone d'étude

1.1 Situation géographique

L'aire de l'étude s'étend sur une superficie d'environ 8200 km², Elle est située au centre oriental du Maroc et représente la partie centrale de la chaîne montagneuse du Haut Atlas, faisant partie des hauts bassins de Ziz et Rhéris. Ses limites naturelles sont constituées par l'accident sud-atlasique au Sud qui le sépare au bassin Crétacé d'Errachidia-Boudnib, le bassin de la Haute Moulouya au Nord, le bassin d'Oum Er-Rbia et du Haut Draa à l'ouest et le bassin de Guir y compris le plateau de Gourrama à l'Est. Cette zone s'étend sur une superficie d'environ 8200 km² et elle est limitée par les coordonnées Lambert suivantes : 450 km < X < 630 km et 100 km < Y < 220 km.

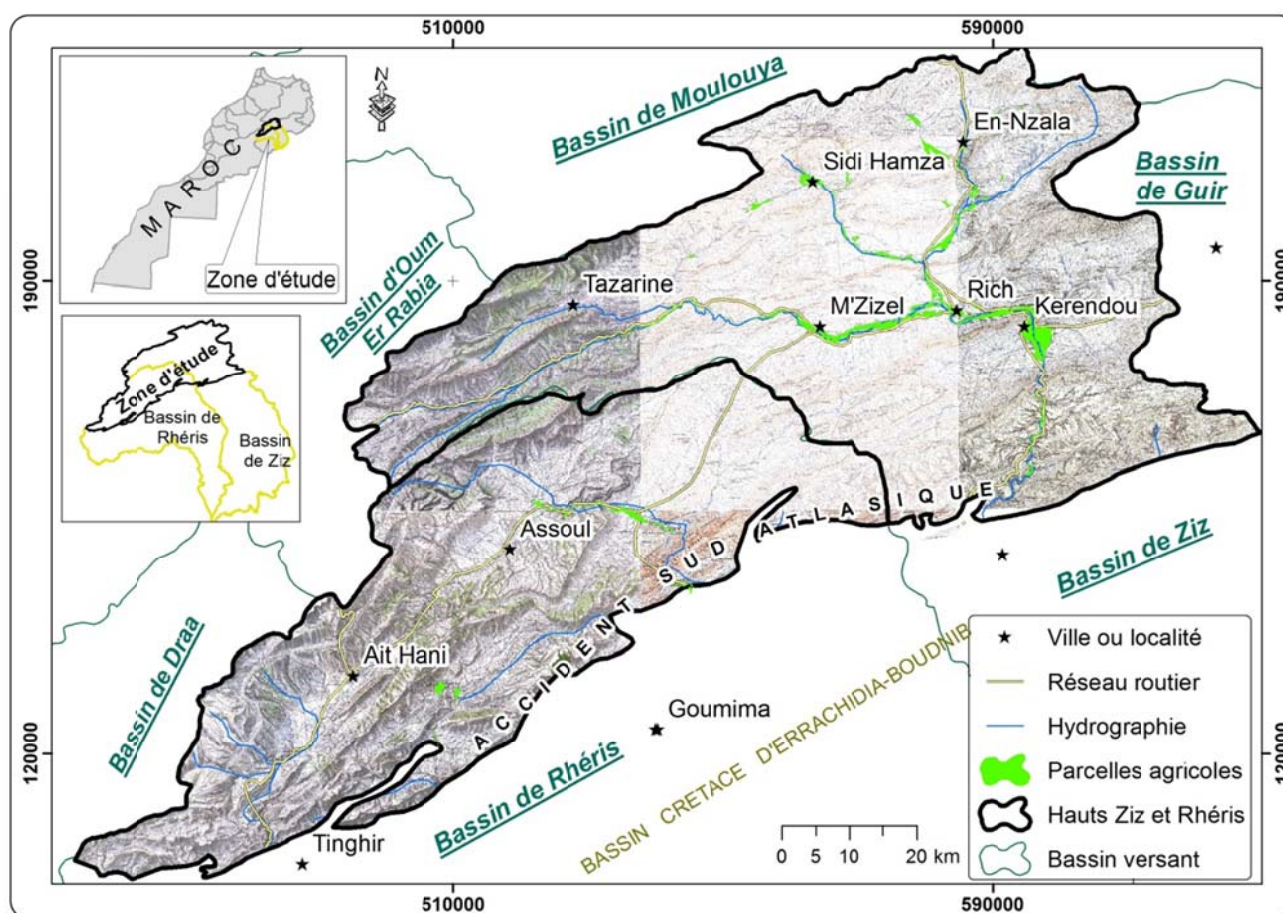


Figure 3 : Situation géographique de la zone d'étude

Ce bassin hydrogéologique est le plus important bassin du domaine atlasique par son développement longitudinal et transversal. Le développement et l'extension des formations calcaires du Jurassique donnent à cette partie de l'Atlas un caractère particulier ; Tous les massifs sont constitués de plis jurassiens assez réguliers, fréquemment rompus par des failles ; les anticlinaux allongés, aigus, dissymétriques succèdent aux synclinaux très larges à allure de cuvettes. Les grandes vallées présentent, sur les deux, versants nord et sud, une succession de vasis longitudinaux et de cluses transversales.

1.2 Cadre administratif

L'aire de l'étude relève du territoire des provinces de Midelt, d'Errachidia et de Tineghir. Selon le découpage administratif de 2009, les bassins de haut Rhéris et Ziz couvrent :

- + 53 % de la province de Midelt, dont 18 communes faisant partie de la zone d'étude ;
- + 25 % de la province d'Errachidia, dont 6 communes faisant partie de la zone d'étude ;
- + 22 % de la province de Tineghir, dont 7 communes faisant partie de la zone d'étude.

La Figure 4 représente la répartition de la superficie des provinces dans le haut Ziz et Rhéris.

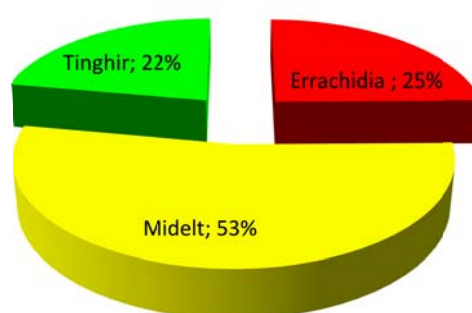


Figure 4 : Répartition de la superficie des hauts bassins de Ziz et Rhéris par province

1.3 Population

Selon le Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2014 (RGPH-HCP, 2014), la zone compte 261 852 habitants, contre 232 025 enregistrés en 2004 soit un taux d'accroissement moyen de 1.22%. Cette population est répartie entre trois provinces dont Midelt qui représente toute seule 59% de la population totale (Tableau 1).

Tableau 1. Répartition de la population par province (RGPH 2014 –HCP)

Province	Population	%
Tinghir	55 389	21%
Errachidia	53 091	20%
Midelt	153 372	59%
Total	261 852	100%

La taille moyenne des ménages est de 5.58, il reste relativement élevé en comparaison avec la moyenne nationale (5.28). Elle était de 6.33 en 1994, puis 6.13 en 2004, soit une tendance à la baisse. La population rurale a presque stagné durant la dernière décennie, ce qui s'est traduit par l'augmentation du taux d'urbanisation.

La faible densité de population (près de 32 hab/km²) est due au caractère semi-aride de la zone où les populations sont groupées dans les vallées et les oasis. Ce caractère groupé de l'habitat de la région, facilite l'accès aux équipements socio-économiques.

1.4 Activités socio-économiques

1.4.1 Agriculture et périmètres irrigués

Dans la zone d'étude, le climat est en majorité semi-aride à aride. La végétation est très rare à l'exception des palmeraies localisées autour des points et le long des principaux cours d'eau, sous forme d'oasis étroites (à l'exception de la palmeraie de Rich).

Le secteur agricole constitue la principale source de revenu et fait travailler la majeure partie de la population active, occupant ainsi le premier rang en ce qui concerne le développement de l'économie locale.

L'agriculture est dominée par la micropropriété. En effet, la superficie moyenne par exploitation est estimée à 1 ha, avec 3 parcelles en moyenne par propriété. Près de 98% des exploitations ont une superficie inférieure ou égale à 5 ha. Les cultures céréalières, maraîchères et fourragères sont un appoint précieux dans une région où l'arboriculture est prédominante (principalement le palmier-dattier accompagné d'arbres fruitiers).

Les palmeraies constituent un milieu spécifique dont l'équilibre, soumis aux fluctuations des ressources en eau, demeure fragile. Ces zones sont irriguées par les eaux de sources, des oueds, auxquelles s'ajoutent les eaux de nappes superficielles.

Les bassins de Ziz et Rhéris constituent par ailleurs l'un des pôles réputés du Royaume, aussi bien en ce qui concerne l'importance de son cheptel que pour ce qui est de la présence de quelques espèces typiques.

L'ensemble des périmètres irrigués concerne la Petite et Moyenne Hydraulique (PMH), axée autour des moyens d'irrigation traditionnels (Seguias et Khettaras). Ces périmètres sont irrigués par dérivation des eaux pérennes des principaux oueds, au moyen des prises traditionnelles (seuils de dérivation) alimentant un réseau de séguias en terre ou en ciment (photo 1). La PMH est prépondérante le long des oueds Ziz et Rhéris (Figure 5);

Dans le reste de la zone, des fins d'irrigations disparates sont développées, qui sont basées notamment sur les prélèvements d'eau à partir des petites nappes superficielles à productivité limitée.



Photo 1 : Seguia de dérivation et PMH de Ziz

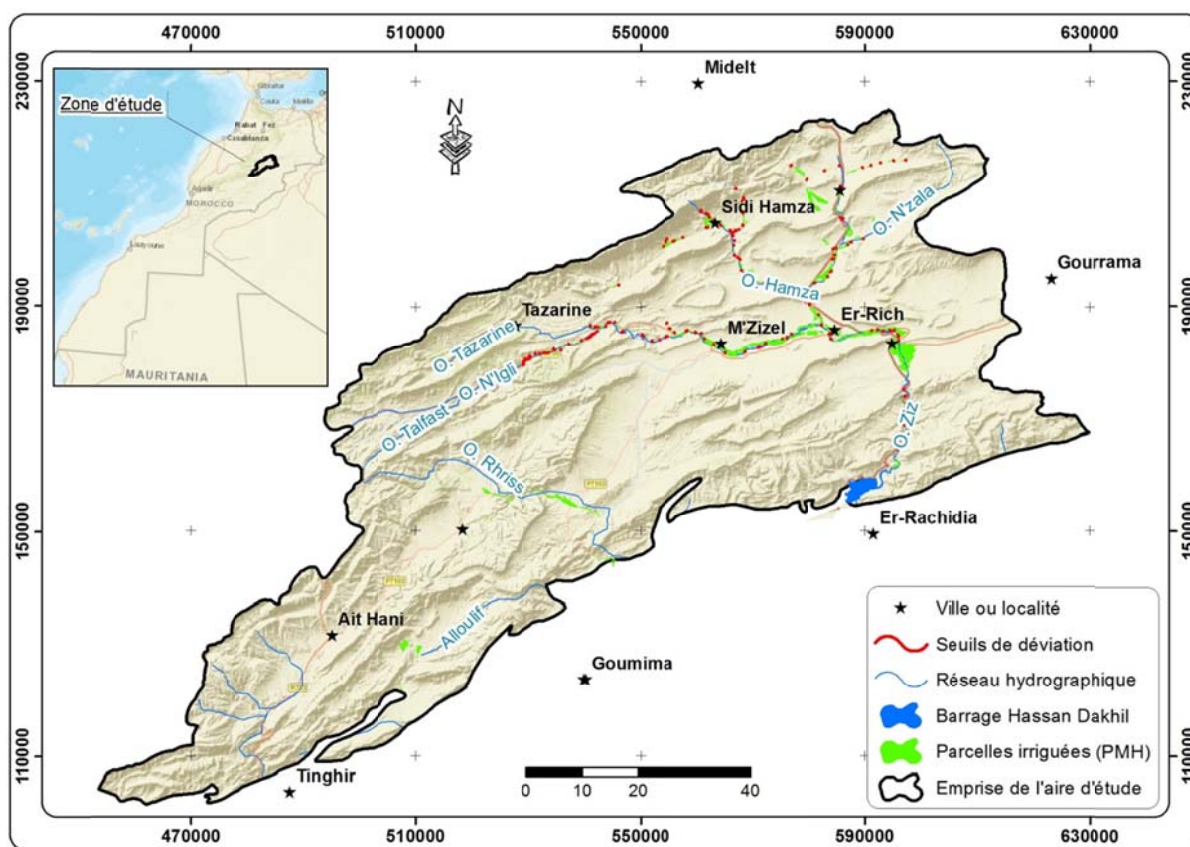


Figure 5 : Situation du périmètre de moyen hydraulique des hauts bassins de Ziz et Rhéris (ORMVAH, 2017)

1.4.2 Tourisme

La zone d'étude recèle plusieurs potentialités touristiques, notamment ses paysages pittoresques variés, l'hospitalité de ses habitants, la richesse et la diversité de son folklore.

L'espace montagneux est d'une importance écologique, et riche aussi bien au niveau naturel que culturel, celui-ci offrant la possibilité de pratiquer plusieurs sport liés à l'activité du tourisme de montagne. Les gorges notamment celles du Todgha et de Dadès sont très fréquentées par les grimpeurs pour leurs parois pouvant atteindre 300 mètres. Celles-ci parois sont très bien équipées

mais beaucoup d'entre elles sont encore vierges. En outre, les Oasis sont caractérisés par de superbes palmeraies avec de nombreux ksour où se retrouvent la population, celui de Tinghir sans doute est l'un des plus remarquables de la zone.

1.4.3 Artisanat

Le secteur de l'artisanat est l'un des secteurs qui participe au développement économique et social des trois provinces de la zone (Midelt, Errachidia et Tinghir). Il occupe une main d'œuvre importante et draine des revenus non négligeables. Les métiers les plus exercés sont : la menuiserie d'art, ferronnerie d'art, fabrication des soufflets (spécialité exclusive de la ville de Tinghir), poterie rurale, bijouterie, tissage et cordonnerie.

Le secteur d'artisanat est encadré par les délégations provinciales de l'artisanat et les agences de l'artisanat, comme celle de Tinghir.

1.4.4 Activités minières

Cette activité revêt une certaine importance dans la région notamment dans la province de Tinghir qui dispose d'une mine d'Argent à Imider. Elle constitue la plus grande mine du Royaume pour l'extraction et la valorisation du minerai d'argent. Le gisement d'Imider est exploité par la Société Métallurgique d'Imider (SMI) filiale de l'O.N.A.

La province possède aussi d'autres métaux tels que le Zinc, le Plomb, la Barytine, la Pyrophyllite qui sont exploités sous autorisation en utilisant des moyens traditionnels.

1.4.5 Infrastructure routière

La zone d'étude est axée sur la route nationale (RN13) venant de Meknès en traversant la zone vers Errachidia, la route régionale (RR706) reliant le centre de Rich et Bou Azermou, la RR708 reliant Rich et Gourrama, la RR7103 entre M'Zizel et Ait Hani et la RR701 entre la RR7103 et Goulmima (Figure 6).

A partir de ces axes, l'accès est relativement facile par ces routes nationales, régionales ou provinciales revêtues de qualité moyenne. Cependant, les communes de la périphérie sont parfois extrêmement enclavées ; Dans le cercle Rich-Imilchil, Le réseau routier est constitué de routes régionales et provinciales de faible gabarit et souvent coupées par les crues ou dégradées par l'érosion. La route régionale Rich-Bou Azermou (RR706) est un bon exemple de cette vulnérabilité. La seule route de bonne capacité est la RN 13.

Des efforts considérables sont faits pour compléter et entretenir ce réseau et désenclaver les principales vallées et pour entretenir le réseau, mais les conditions climatiques, le relief et l'érosion sont très défavorables. En outre le trafic est très réduit et reste vraisemblablement, faute de produits à transporter.

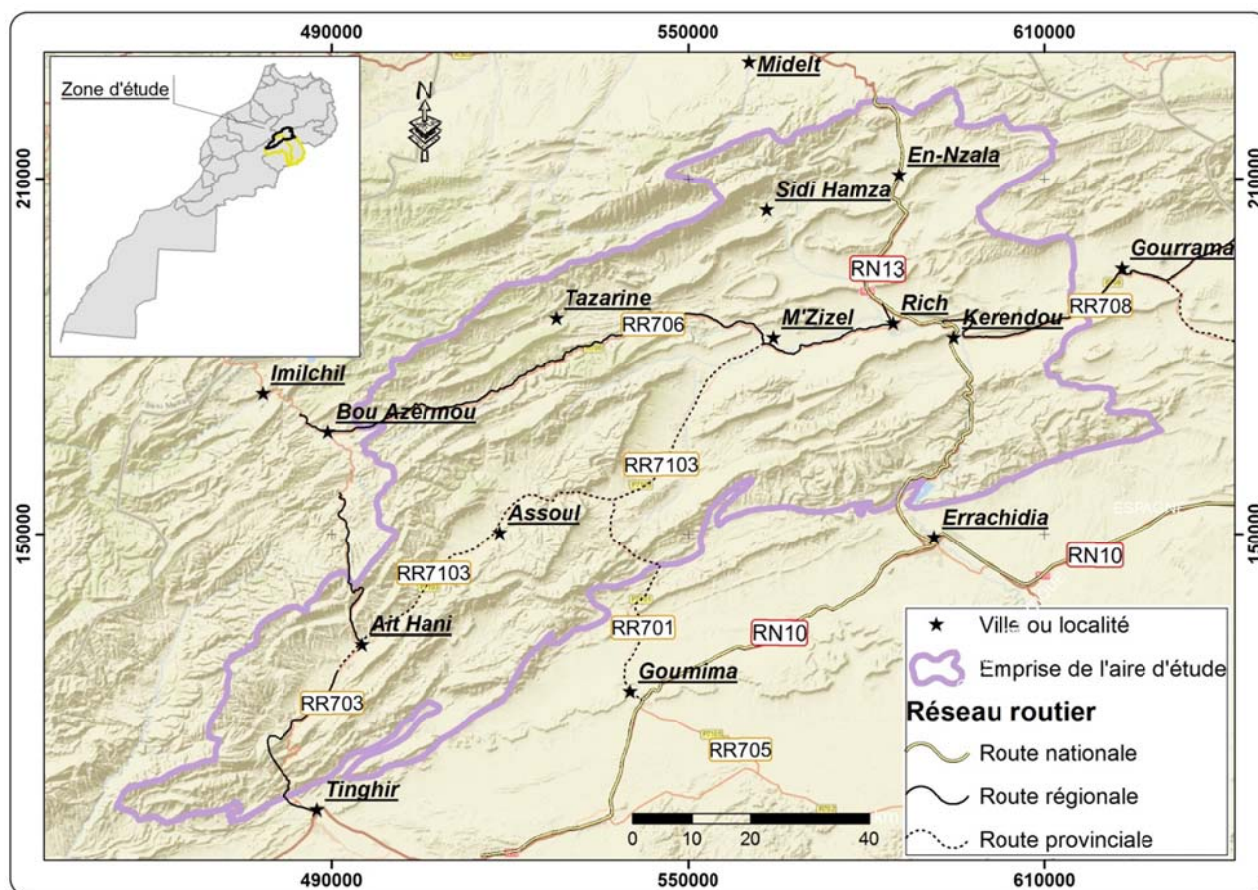


Figure 6 : Réseau routier dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris (METLE, 2018)

Chapitre 2. Cadre géologique et structural

2.1 Synthèse des travaux antérieurs

Le Haut Atlas a fait l'objet de plusieurs études et travaux géologiques. Parmi ces travaux on cite les plus importants (EL Kochri A, 1996 ; Sadki D, 1996 ; Ait Addi A, 2002 ; Ait Addi A, 2002 ; Mehdi M et al., 2003 ; Sarih et al., 2007 ; Michard et al., 2010). La série stratigraphique résultant est peut être résumée comme suit. Du bas en haut on rencontre (Figure 7):

- **Le socle Antécambrien et Primaire** : qui apparaît très localement, dans la zone d'étude (Figure 7). Il est représenté par des schistes, des quartzites ou encore par des roches intrusives.

Trias : joue un rôle important comme un substratum imperméable de la série jurassique et il est le siège de la plupart des eaux salées de la région. Il affleure notamment le long des rides anticlinales (Figure 8). Il est constitué dans le Haut Atlas oriental essentiellement par, des marnes roses et vertes, des grès et des barres calcaires datées du Rhétien notamment aux environs de Figuig (Jbel Guerefed) (EL KOCHRI et CHOROWICZ J, 1988). Il existe également des formations argilo-marneuses le plus souvent salifères et des dépôts évaporitiques surtout gypsifères mais pouvant renfermer des quantités non négligeables de sel gemme (Jbel Mlah) ou de potasse. Des basaltes et des basaltes doléritiques sont généralement inter-stratifiés dans ces formations. Ces basaltes sont pris entre plusieurs couches d'argiles. Selon Michard (1976), la formation argileuse inférieure est très réduite dans cette partie du Haut Atlas. Elle est en discordance angulaire par rapport aux terrains anciens (Michard, 1976). Au Sud de l'Aberdouz (amont de l'oued Rhéris), le Trias est représenté par des marnes rose-violacées à très fines lamines d'oligiste et des lits de gypse peu importants. Quelquefois des marnes rouges avec amas de sel à lits de petits fragments de marnes rouges. Dans les grands affleurements, le basalte s'intercale dans ces marnes, en gisement restreints (Dubar, 1949).

- **Jurassique** : constitue la quasi-totalité de la zone (Figure 7). À une échelle plus grande, il correspond à une époque de différenciation du domaine atlasique marocain en deux parties : les bassins intracontinentaux (Moyen et Haut Atlas) et les bassins côtiers atlantiques (Laville, 1985). Durant cette période deux étapes de développement ont été évoquées pour les plates-formes carbonatées (Dresnay, 1971 et 1988 ; Crevello, 1991 ; Addi, A. (1998). La première étape a donné la plateforme inférieure au cours du Lias inférieur et moyen. Quant à elle, la seconde a donnée la plateforme supérieure surtout au cours du Dogger inférieur et moyen.

- + **Jurassique inférieur** : Le Lias inférieur est caractérisé par une sédimentation carbonatée dans une mer peu profonde avec par endroits, des formations récifales (faciès rouge à

Ammonites). Lévêque (1962) décrit aussi des faciès terrigènes associés aux carbonates. Dans la zone d'étude, la base du Lias inférieur comprend deux assises attribuées à l'Héttangien : Dolomies souvent noires plus ou moins calcareuses et des calcaires marmoréens, gris clair ou oolithiques à sections de Lamellibranches et de Gastéropodes. Ces calcaires sont souvent associés à ceux gris bleuâtres lités et avec silex.

Le Lotharingien est formé dans cette région par de calcaires peu marneux avec des niveaux à silex. Vers la base, prédominent les calcaires bleu-noir encrinétiques avec de fins entre lits marneux rose-violacés. Vers le sommet, les calcaires peu marneux, en bancs plus épais, sont de teintes plus claire, gris bleuâtre ou gris verdâtre. Le Lias moyen est formé d'une série calcaro-dolomitique, se terminant par des formations conglomératiques et des couches rouges appelées aussi séries argilo-calcaires (Dresnay, 1971).

Le Pliensbachien est représenté à l'ouest de la zone d'étude par des calcaires peu marneux avec des lits marneux pouvant contenir des silex et ayant une teinte rose caractéristique. Le Lias supérieur est formé essentiellement de calcaires gris et/ou bleus parfois dolomitiques et récifales renfermant la faune du Domérien. Au-dessus, vient le Toarcien avec des marnes et des marno-calcaires avec des lits argileux de teinte verte et rougeâtre (Russo, 1927).

Dans la région ouest, les faciès habituels du Domérien sont des calcaires marneux gris bleuâtres clairs, parfois à trame argilo-siliceuse, souvent débités en lames ou en grosses écailles avec des entre lits plus marneux. Les bancs sont plus épais et à dominances calcaires au milieu de l'étage plus fins et marneux à la base et au sommet. Le Toarcien est représenté à la base par des marnes vert-jaunâtres à vert-brunâtres avec des lits fins plus ou moins nombreux de grès calcareux brunâtres, au milieu et au sommet, ce sont des marnes verdâtres avec des lits plus ou moins fréquents de boules ou ovoïdes calcaréo-marneux.

+ **Jurassique moyen** : A l'Est de la zone d'étude (Figure 7), le Jurassique moyen est à dominance marneuse avec de nombreuses intercalations marno-calcaires pouvant donner des corniches massives (El Kochri, 1996). Les variations de faciès et d'épaisseur sont importantes mais plus régulières. La plus grande épaisseur semble correspondre à l'axe des bassins synclinaux. Le Bathonien supérieur affleure sur des surfaces moins étendues. Plus à l'Est, les marno-calcaires à Rynchonelles forment une ligne de relief continue. Au Sud, l'Aalénien ne peut être dissocié du Toarcien, dans ce cas les bancs calcaires jaunes à entrelits marneux sont développés au milieu des marnes verdâtres, ces calcaires prédominent au sommet (El Kochri, 1996).

+ **Jurassique supérieur** : le Jurassique supérieur est souvent continental formé essentiellement de grès, pélites et conglomérats rougeâtres, mais ces dépôts débutent au Bathonien. Au sud-ouest de l'Amdrhous, le Jurassique supérieur (Jurassique rouge) se compose à la base de grès et poudingues rouge violacés, parfois noirâtres à éléments du Paléozoïque et du Trias. Puis viennent des grès rouge-briques à stratification entrecroisée alternant avec des marnes.

- **Crétacé** : est très réduit au niveau de la zone d'étude (Figure 7). Plus loin, au Nord d'Anoual, le synclinal de l'oued Oum Chakhourt comporte une série jurassico-crétacé allant du Callovien au Cénomanién. On y trouve des grès plus ou moins consolidés en bancs durs, des conglomérats, des pélites et des marnes argileuses rouges et brunes. Le Crétacé inférieur est transgressif sur la série jurassique. Il présente une variation latérale de faciès dans cette zone où il est représenté par une dalle de calcaire lacustre visible à la source d'Ain Mellouk ayant une vingtaine de mètres d'épaisseur et repose sur un horizon argilo-gréseux rouge et un conglomérat peu épais discordant sur le Bathonien de Jbel Mechkakour. Le Crétacé moyen comprend des marnes jaunes ou versicolores et des calcaires massifs plus ou moins récifaux qui couronnent les hauteurs de la cuvette de Hameïda et Tinejamine. Dans la région du Tadighoust, la base du Crétacé a été tracée par Dubar (1949) sous les marnes et calcaires marneux vert, inclus dans les grès rouges jurassico-crétacés. La série commence par des grès rouges ou souvent roses ou gris bleuâtres, des lits à stratification entrecroisée alternant avec des marnes rouges, parfois vertes allant à plus de 100 mètres de puissance, sur lesquels, viennent des marnes rouges, vertes ou grises, des marnes vertes et calcaires marneux, puis des calcaires du Turonien et se termine par des marnes gréseuses rouge-orangées du Sénonien.

- **Tertiaire** : L'Eocène est conservé seulement dans la partie sud-ouest de la zone d'étude au pied sud du Haut Atlas (Figure 7). Il repose sur des grès rouges rapportés au Sénonien, des grès rouges à stratification entrecroisée, des marnes vertes puis des calcaires gréseux à stratification entrecroisée. L'Oligo-Miocène semble faire défaut dans la région d'étude. Il est plutôt développé à l'extérieur de l'aire d'étude dans les zones orientales où il est représenté en particulier par des conglomérats, des grès rouges et des calcaires lacustres. Le Pliocène est représenté surtout au piedmont sud du Haut Atlas ; Il est constitué dans l'essentiel par des conglomérats, des calcaires lacustres, des grès fins tendres et des marnes roses (Duffaud F, 1960).

- **Quaternaire** : Les terrains quaternaires sont très développés et occupent notamment les cuvettes synclinales et les zones de plaines (Figure 7). Selon les endroits, ces terrains sont représentés par des poudingues plus ou moins cimentés, des alluvions graveleuses, des calcaires lacustres, des

limons et alluvions de basses terrasses ou des cailloutis. Dans la zone d'étude, il est important de noter l'abondance de cônes d'alluvions ou de déjections et de glacis de versant ou de piémonts.

La Figure 7 et la Figure 8 schématisent la géologie de la zone d'étude.

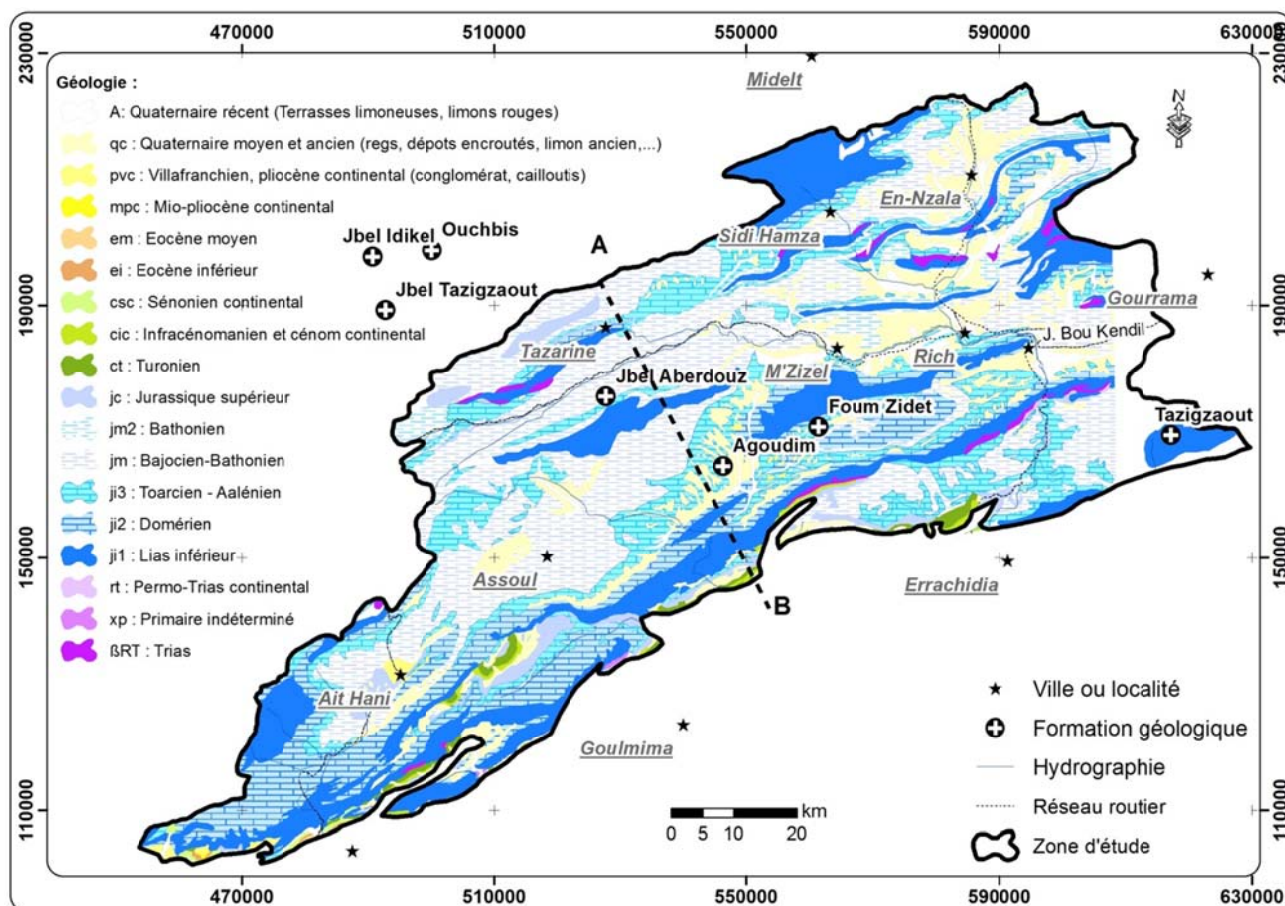


Figure 7 : Géologie de la zone d'étude (extraits des feuilles géologiques de du Haut Atlas au Nord de Ksar Es-Souk et de Boudenib au 200ème)

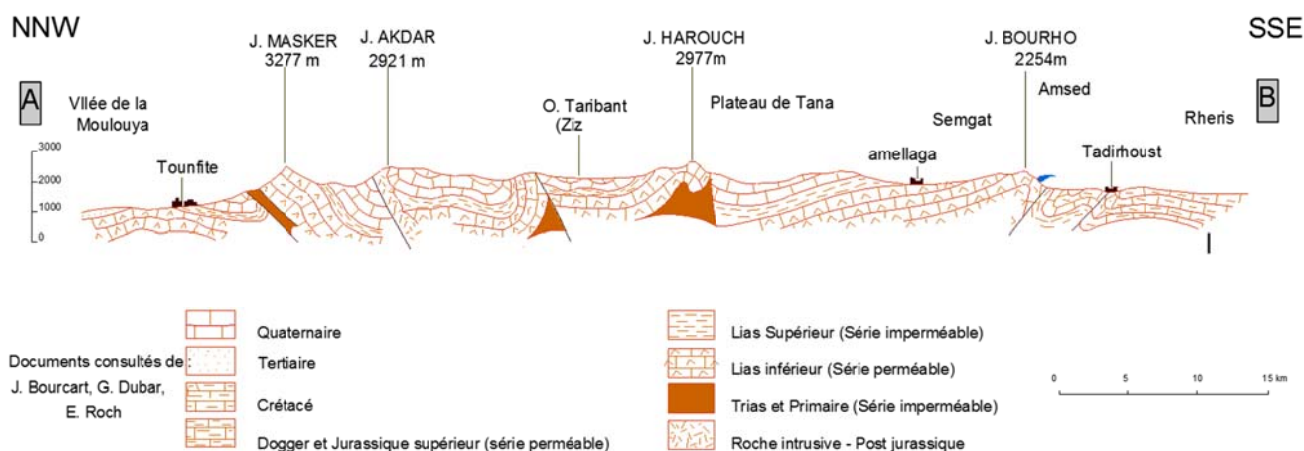


Figure 8 : Coupe géologique AB de la Figure 7, traversant la zone d'étude (M. COMBE, 1977, modifiée)

Malgré leur qualité, l'exploitation de ces travaux des géologues du Dresnay (1975-1988) ; Warme (1988) ; Mattauer (1977) ; Laville (1985) et El Kochri (1996), ont présenté des difficultés pour satisfaire les objectifs de la présente étude. Plus concernés en effet de stratigraphie, de structurale et de paléontologie que de faciès lithologiques, ces travaux ont été interprétés et simplifiés dans une optique hydrogéologique. La série stratigraphique résultante de cette synthèse a pu être établie, et le log stratigraphique synthétique Figure 9 schématise, la succession stratigraphique des formations, susceptibles d'être des réservoirs aquifères.

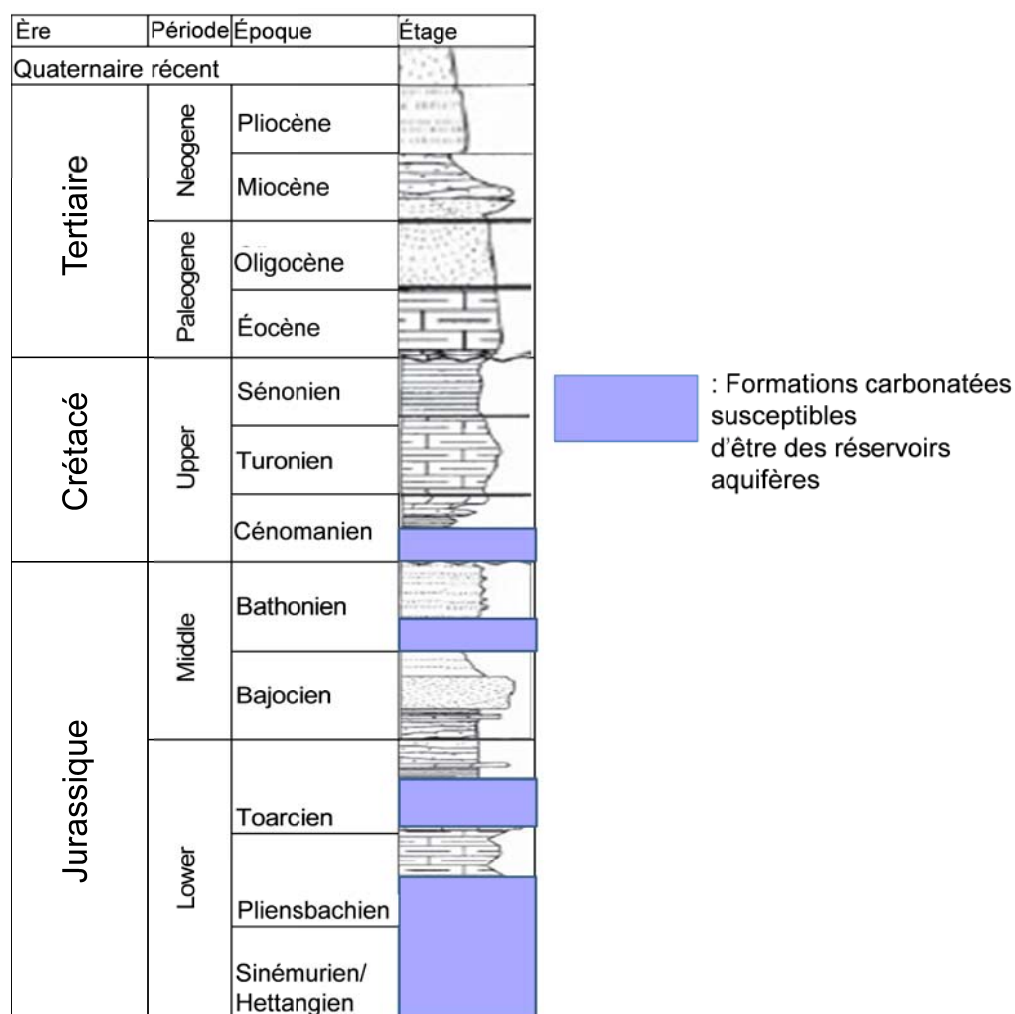


Figure 9 : Coupe stratigraphique synthétique, généralisée à l'échelle de la chaîne du haut Atlas, montrant les différentes formations rencontrées (Beauchamp et al., 1999 ; modifié).

D'après cette analyse préliminaire, il apparaît que les réservoirs aquifères potentiels correspondent aux niveaux carbonatés du Lias inférieur – Domérien, de l'Aalénien – Dogger, du Quaternaire et dans un degré moindre, de quelques niveaux du Crétacé, mais ces derniers restent très limités dans l'espace (Figure 9).

Dans le but de caractériser par la suite leur géométrie, l'extension, la lithologie, l'hydrodynamisme, les variations latérales et verticales de faciès, ces réservoirs qui sont susceptibles d'être le siège des principaux réservoirs aquifères du Haut Atlas sont décrits en détail.

2.1.1 La série du Lias inférieur – Domérien

Dans le Haut Atlas, le Lias inférieur et moyen correspondent au développement de la première plateforme carbonatée (Du Dresnay, 1971 a/b & 1979 ; Crevello, 1991 ; Ait Addi, 1994). Ils résultent d'une sédimentation carbonatée dans une mer peu profonde avec par endroits, des formations récifales, formés essentiellement de couches dolomitiques, des calcaires marmoréens, des calcaires peu marneux avec des niveaux à silex. Selon Studer, 1980, le Lias est subdivisé en quatre formations fondamentales (Figure 10).

- + La formation des dolomies et calcaires massifs d'Idikel ;
- + La formation des calcaires lités d'Aberdouz ;
- + La formation d'alternance calcaréo-marneuse d'Ouchbis ;
- + La formation des grès calcaires et des marnes gréseuses de Tagounite.

- **La formation d'Idikel**

Cette formation a été définie à Jebel Idikel au sud-ouest de Midelt et à 12 km à l'ouest de Tounfite (Figure 7). Son épaisseur varie de 350m à 800m, et comporte deux membres:

- + Un membre inférieur débutant par des bancs dolomitiques, se poursuit par des fines laminites, alternant avec des bancs parfois très massifs (plusieurs mètres). Les strates deviennent ensuite plus massives et les dolomies disparaissent progressivement au profit des calcaires,
 - + Un membre supérieur mieux lité. on y observe des calcaires, biohermes à spongiaires.
- **La formation de Foum Zidet** : Au sud-ouest de la localité de Rich (Figure 7). C'est la partie supérieure de la formation d'Idikel de Studer (1980) avec la présence de trois membres successifs : a) membre inférieur formé par des calcaires bioclastiques à mollusques, brachiopodes et spongiaires, b) membre médian à calcaires lités en petits bancs et c) membre supérieur à monticules de spongiaires interdigités avec les calcaires lités.

- **La formation d'Aberdouz**

Elle a été définie à Jebel Aberdouz à l'ouest de Rich (Figure 7). Sa puissance varie de 350m à 500m. Les calcaires lités d'Aberdouz, de couleur bleu-noir, sont formés par des petits bancs ondulés de calcaires (10 à 20cm) qui se biseautent parfois en se moulant les uns sur les autres. Des petits niveaux de marnes roses violacées apparaissent entre les horizons carbonatés.

• La formation d'Ouchbis

Cette formation a été définie à Jebel Ouchbis au sud-ouest de Midelt, son épaisseur varie entre 325 et 700m. C'est une alternance de bancs calcaires épais de plusieurs dizaines de centimètres et de bancs plus ou moins développés (1 à 10cm) de marno-calcaires et de marnes. Dans sa partie supérieure, les intervalles marneux deviennent plus importants et les couches calcaires sont plus marneuses.

• La formation de Tagounite

Elle est constituée par une sédimentation à dominance de grès et de marnes gréseuses, de couleur verte à brune. Sa puissance oscille entre 200m et 230m.

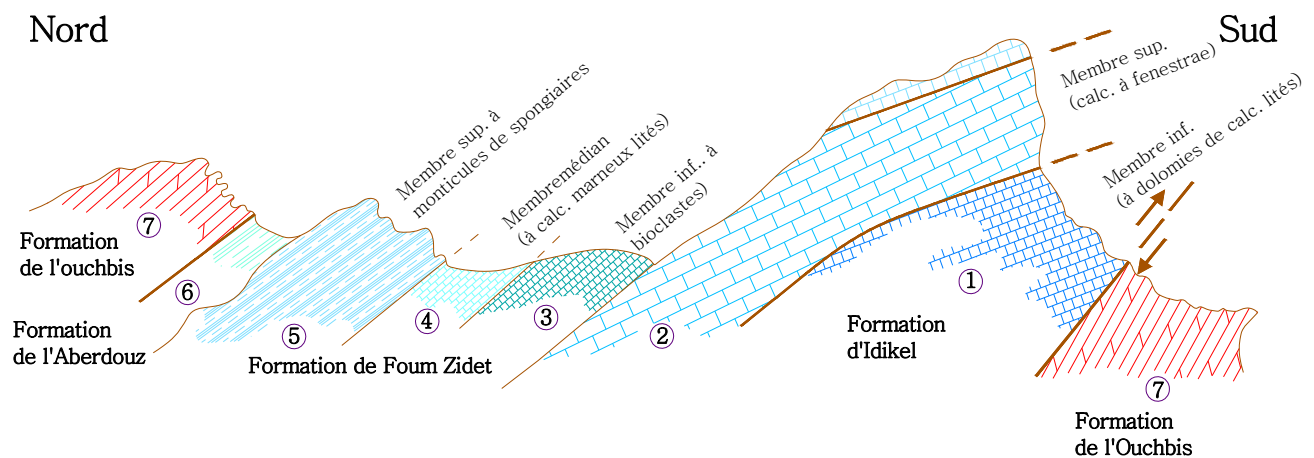


Figure 10 : Subdivision des unités géologiques du Lias du Haut Atlas central (Studer, 1980 ; modifié)

Dans sa globalité la série est carbonatée, les bancs sont souvent épais et, à dominances calcaires à la base et au milieu de la série, plus fins et gréseux au sommet. Elle se caractérise par une variation de faciès et d'épaisseur d'un endroit à un autre. Cette variation est fonction de la présence des structures syn-sédimentaires, elle pourra être expliquée aussi par la présence d'un paléorelief, d'âge anté-Lias inférieur et probablement Hercynien (Sarih, 2008). Sa puissance est très variable :

- + aux environs de 400 m dans la région de Talghamt-Bertat (Kochri, 1996) ;
- + aux environs de 850m dans la région de Taberhout (Sarih, 2008) ;
- + près de 160m dans la région de Tagount (Sarih, 2008) ;
- + plus de 510m dans la localité de Gourrama (IRE 694/39) ;
- + 440 m à oued Ikes (Sarih, 2008) ;
- + aux environs de 500m dans la région de Taabest (Sarih, 2008) ;
- + plus de 159m dans la localité d'Amsed (IRE 917/47) ;
- + Près de 230m dans la région de Sedrar (Sarih, 2008) ;
- + plus de 150m dans la localité d'Ait Hani (IRE 922/47).

2.1.2 La série Aalénien – Dogger

Les synclinaux du Haut Atlas central sont formés essentiellement par les faciès du Lias supérieur-Dogger. Le Dogger correspond au développement de la deuxième plateforme carbonatée (Du Dresnay, 1971 a/b & 1979 ; Crevello, 1991 ; Ait Addi, 1994). Lui-même (cette plateforme) a subi deux étapes d'individualisation en donnant naissance à la plateforme d'Aalénien-Bajocien puis la plateforme du Bajocien-Bathonien (Ait Addi, 1994 ; Ait Addi et al., 1998). Ces ensembles correspondent respectivement aux formations d'Agoudim (Studer, 1980) et Tazigzaout (Ait Addi, 1994 ; Ait Addi et al., 1999 ; Ait Addi, 2000).

- **La formation d'Agoudim**

Cette formation présente des épaisseurs variables, ce qui implique une variation du taux de subsidence et de sédimentation tout le long de la série. Selon (Ait Addi, 1999), cette formation est constituée par 4 membres lithologiques allant du Toarcien jusqu'au Bajocien :

Membre I : formé essentiellement de marnes grises et de marnes jaunes ;

Membre II : peut atteindre une puissance de 120m, et formé de marnes à aspect schisteux, intercalées avec des dalles calcaires biodétritiques lités ;

Membre III : de 280 à 300m, il renferme des marnes bleu-noires à aspect schisteux bajociennes, elles sont caractérisés par des intercalations de calcaires fins ;

Membre IV : d'environ 160m, il correspond à la première barre de calcaire à corniches qui coiffe la formation d'Agoudim et qui est bien individualisée aux alentours des synclinaux perchés des Jebel Assameur et Boukendil.

- **La formation de Tazigzaout**

Le Jebel Tazigzaout (Figure 7) correspond à l'unique synclinal ayant préservé cette formation. Sur les synclinaux voisins, l'absence ou l'existence partielle de cette formation est probablement lié à une intense érosion cénozoïque (Ait Addi, 2002). Il s'agit d'une succession stratigraphique de 550 à 600m de puissance qui comporte du bas en haut les membres suivants :

Membre basal : épais, d'environ 340m et formé dans sa grande partie par des intervalles de marnes jaunes-vert et gris noir, entrecoupées de bancs de calcaires marneux et de calcaires fins.

Membre intermédiaire : d'environ 150m de puissance et composé de marnes gris-bleu à aspect schisteux, armées de barre de calcaire fins.

Membre sommital : d'environ 100m de puissance, correspond à la deuxième barre de calcaires à corniches.

On constate que la série de l'Aalénien et du Dogger est caractérisée par une variation d'épaisseur et de faciès, ce qui implique une variation du taux de subsidence et de sédimentation tout le long de la série. La Figure 11 présente une coupe stratigraphique type au niveau de l'axe du Haut Atlas au droit de la vallée de Ziz.

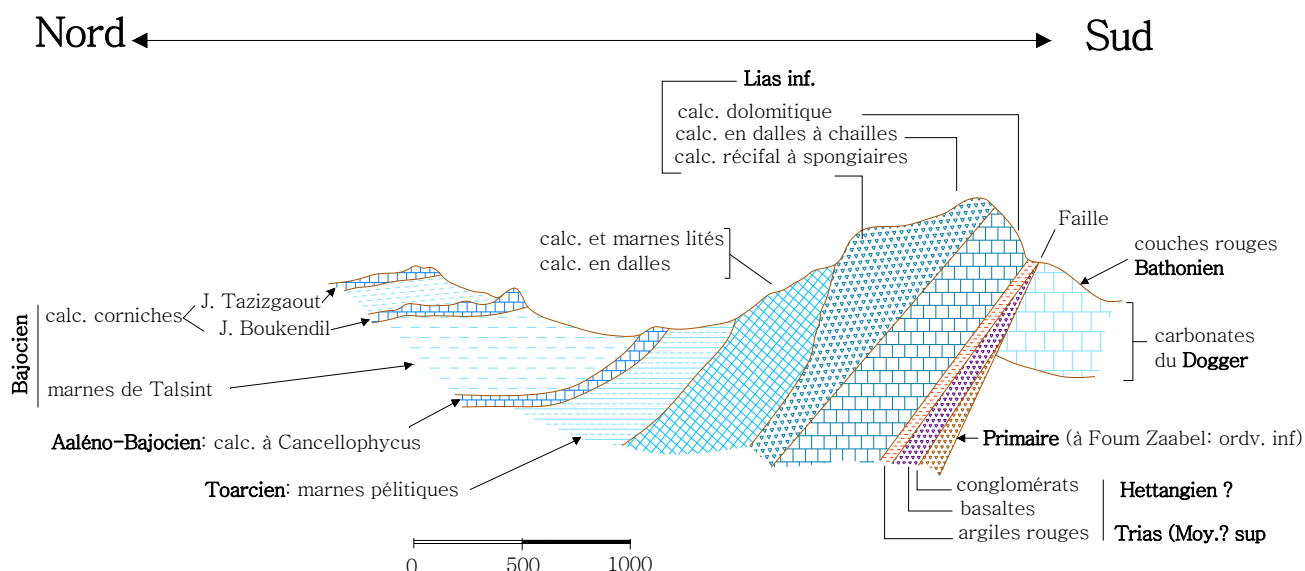


Figure 11 : Coupe stratigraphique type dans l'axe du Haut Atlas, au droit de la vallée de Ziz ; Schéma du Dresnay (1966), modifié par Michard (1976) ; schéma légèrement modifié et complété

2.1.3 Les formations retenues renfermant des réservoirs aquifères

L'analyse ci-dessus souligne donc la grande complexité des terrains jurassiques du haut Atlas. Le contexte géologique décrit ci-dessus, accompagné des coupes géologiques et logs stratigraphiques ont permis de définir les formations susceptibles d'être des réservoirs aquifères potentiels de la zone. Les niveaux définissant ces réservoirs aquifères sont décrits ci-dessous.

1) Lias inférieur – Domérien

Cette série est complexe et peut contenir selon la description des différentes formations décrites ci-dessus (d'Idikel, d'Aberdouz, d'Ouchbis et Tagounite), un réservoir puissant plus ou moins continu, de calcaires massifs, de calcaires lités, d'alternance calcaréo-marneuse et des grès calcaires et marnes gréseuses. Ce réservoir est séparé aux autres réservoirs aquifères sus-jacents par les membres 1, 2 et 3 de la formation d'Agoudim, essentiellement marneux.

2) La série Aalénien – Dogger

Cette série est complexe et peut contenir plusieurs niveaux aquifères potentiels, les principaux sont :

- + Le premier niveau potentiel de l'Aalénien-Bajocien qui est représenté par le membre 4 de la formation d'Agoudim, sous forme d'une série de calcaires à corniche de 160m de puissance environ ;
- + Le deuxième niveau potentiel du Bajocien-Bathonien qui est représenté par le membre sommital de la formation de Tazizgaout, d'environ 100m de puissance et composé de calcaires à corniches.

Ces deux niveaux sont séparés par des dépôts essentiellement marneux des membres basal et intermédiaire de la formation de Tazizgaout.

Par la suite, ces niveaux aquifères potentiels seront identifiés et délimités en s'appuyant sur les données des sondages mécaniques et électriques.

2.2 Apports de la géophysique et des sondages mécaniques et schéma conceptuel

2.2.1 Les sondages et forages mécaniques

La documentation principale relative aux forages provient évidemment de l'inventaire des forages existants dans les archives IRE de l'agence du bassin hydraulique du Guir Ziz Rhéris et quelques rapports des compagnes correspondantes (DGH, 1996 ; ONEE-Branche eau, 2002 ; ABHGZR, 2012).

Toute la documentation disponible a été rassemblée, puis dépouillée par nos soins ; elle a été synthétisée pour chaque forage sous la forme d'une fiche unique à partir des rapports, des comptes rendus, et des fiches IRE existants. Ainsi, ont pu être reconstituées totalement 365 fiches synthétiques de forages, qui constituent la base de ce travail. Ces informations ont été traitées et rassemblées dans une base de données informatique Excel. Tous les points recensés utilisés, figurent sur la Figure 12.

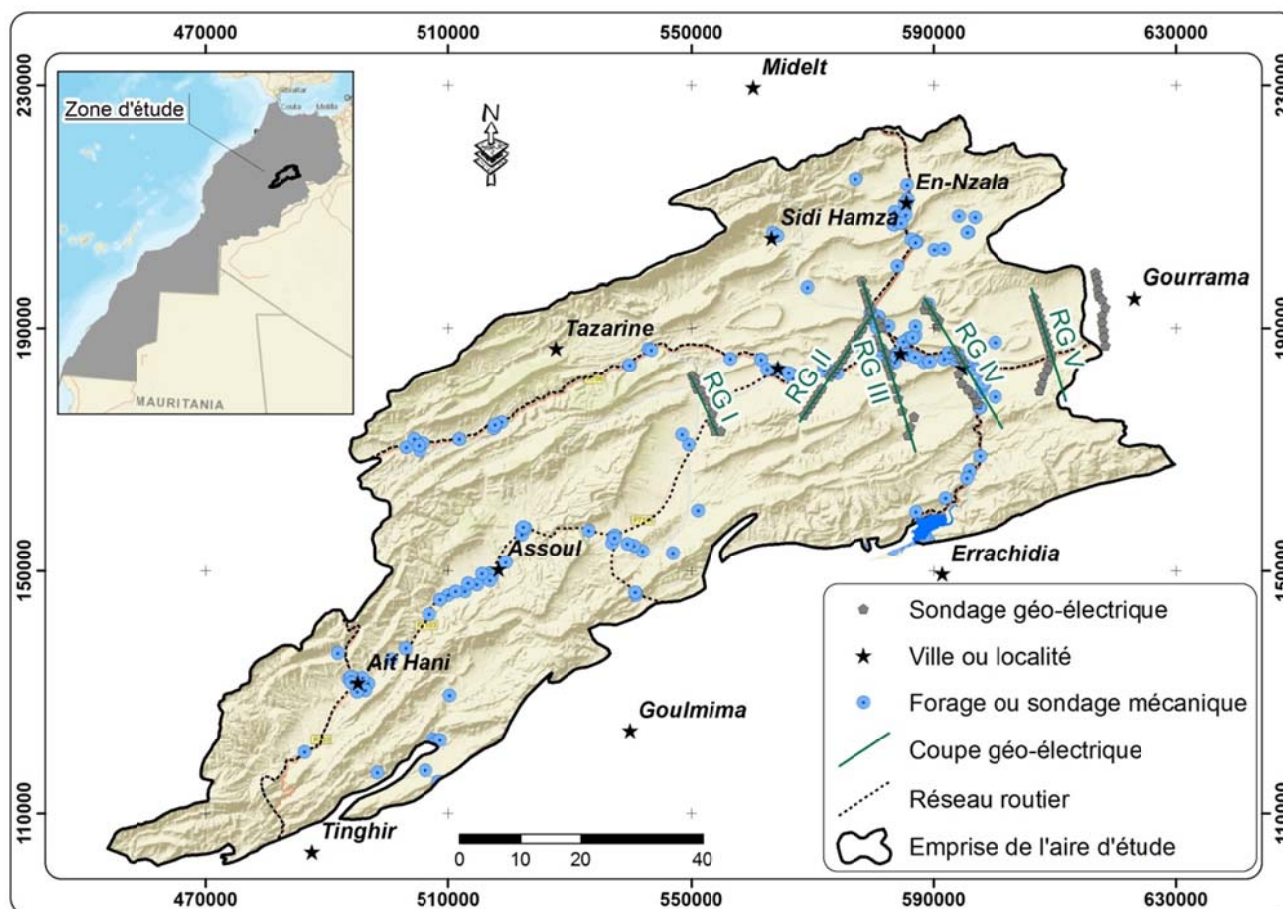


Figure 12 : Situation géographique des forages et sondages mécaniques et géo-électriques (LPEE, 1993 ; DGH, 1996 ; ONEP, 2002 ; ABHGZR, 2012)

2.2.2 Campagnes géophysiques

Les objectifs de cette partie sont cités comme suit :

- Etudier l'allure du toit du substratum de chaque aquifère et préciser la structure du bassin ;
- Etudier les variations latérales et verticales des couches électriques constituant les aquifères potentiels ;
- Etudier les relations structurales entre les différentes formations aquifères potentielles de la zone d'étude ;
- Préciser l'extension et la continuité des formations aquifères ;
- Préciser la lithologie des formations et en déterminer l'épaisseur.

Pour répondre à ces objectifs, nous avons repris les données des campagnes géophysiques réalisées par le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes (LPEE) entre 1992 et 1993. Ces reconnaissances géophysiques au moyen de la méthode électrique de grandes longueurs de ligne ont été effectuées pour le compte de la Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE) au niveau de la région de Rich et s'est prolongée vers Gourrama jusqu'à la localité de Bni Tadjit.

Plus de 220 sondages électriques répartis sur une superficie d'environ 3000 km² et suivant 10 profils géo-électriques ont été réalisés (Figure 12). Ces sondages électriques de type Schlumberger ont été exécutés avec une longueur de ligne AB, entre les électrodes d'émission variant entre 8000 et 10000 m. Pour la présente étude, 6 profils géo-électriques englobant 96 sondages faisant partie de la zone d'étude.

Plusieurs sondages d'étalonnages ont été calibrés sur les forages mécaniques pour permettre de déterminer les résistivités vraies des couches constituant le sous-sol et d'établir des corrélations électriques tout au long des profils électriques. Les logs lithologiques restitués, comparés aux diagrammes de quelques sondages électriques permettent d'attribuer une résistivité à chaque faciès (LPEE, 1993).

Ainsi, ils montrent que le sous-sol est formé par des dépôts hétérogènes correspondent à une succession de couches résistantes et de couches conductrices, notées C1, R1, C0 et R0, attribuée respectivement aux complexe Bajocien-Bathonien, à l'Aalénien, au Toarcien et au Domérien. L'ensemble est recouvert dans la plus part du temps par une couche de couverture attribuée au Quaternaire d'une épaisseur variable (Tableau 2).

Tableau 2. Valeurs de résistivité des niveaux résistants et conducteurs (LPEE, 1993).

Couche n°	Résistivité $\Omega.m$	Formation	Lithologie	Coupes géo-électrique
C1	de 17 à 80	Complexe Bajocien - Bathonien		RG1
	de 35 à 60			RGII
	de 21 à 70			RGIII
	environ 31			RGIV
	de 14 à 100			RGVI
	de 30 à 42			RGVI
R1	de 660 à 918	Aalénien		RG1
	de 450 à 1500			RGII
	de 191 à 1446			RGIII
	de 468 à 729			RGIV
	de 260 à 1270			RGVI
	de 205 à 582			RGVI
C0	de 11 à 91	Toarcien		RG1
	de 20 à 70			RGII
	de 11 à 96			RGIII
	de 14 à 164			RGIV
	de 18 à 135			RGVI
	de 21 à 73			RGVI
R0	de 600 à 1290	Domérien		RG1
	de 748 à 3220			RGII
	de 483 à 1798			RGIII
	de 209 à 2800			RGIV
	252 à 2025			RGVI
	de 405 à 1782			RGVI

Les résultats obtenus à partir des sondages électriques étalons ont conduit aux observations suivantes:

- + Pour une même formation, la résistivité peut varier largement d'un sondage à un autre ;
- + Les formations marno-calcaires à dominance marneuse du Toarcien correspondent au niveau le plus conducteur suivi par les marno-calcaires à dominance marneuse du complexe Bathonien-Bajocien ;
- + Les formations calcaires et marno-calcaire du Domérien correspondent au niveau le plus résistant suivi par les marno-calcaires à dominance calcaire de l'Aalénien ;

Malgré les variations de résistivité, les résultats obtenus par l'ensemble des sondages électriques ont permis de déterminer les caractéristiques électriques des différentes unités géologiques, leurs épaisseurs, ainsi que la géométrie de l'ensemble des aquifères.

2.2.3 Difficultés rencontrées

La plupart des coupes de sondages et forages mécaniques, établies lors de la foration au cours des décennies de travaux, par différents géologues, sondeurs, ou techniciens successifs, ne présentent aucune unité, et sont rarement interprétées de façon précise en stratigraphie. De ce fait, elles offrent de nombreux risques d'erreurs d'interprétation, parmi lesquels on cite :

- + la grande puissance des formations jurassiques sont rarement traversés par les forages, souvent supérieurs à 100 m de profondeur ;
- + Les superpositions fréquemment décrites de marnes sur calcaires ou sur dolomies, peuvent correspondre à plusieurs séquences de la série jurassique ; La vraie nature, l'âge réel de ces couches, parfois rencontrées jusqu'à des profondeurs relativement importantes n'étant que rarement discernables ;
- + Les marnes ou marno-calcaires, fréquemment rencontrées en tête de formations, sont souvent interprétées comme bajocien ou bathonien mais pourraient bien parfois être Aalénien ou encore Toarcien ;
- + Des marnes et calcaires de faciès très semblables sont présents à plusieurs niveaux dans la série stratigraphique. Elles peuvent appartenir à 3 étages différents : Toarcien, Aaléno-bajocien ou Lias, qui sont séparées par plusieurs centaines de mètres dans la série stratigraphique ;

Il est clair que toutes ces incertitudes, qui ne peuvent que très rarement être levées sur la foi des seuls indices ténus résultant de la description des documents d'archives, rendent parfois extrêmement difficile dans les détails, la compréhension des structures, et tout particulièrement au centre des

bassins synclinaux profonds, où les structures profondes et complexes sont situées à très grandes distances des affleurements des bordures qui pourraient en permettre la compréhension.

De la même façon, les liens interprétatifs, que l'on peut tenter entre les coupes géologiques des forages connus et les résultats des sondages électriques proches, sont loin d'être évidents. Le premier contact géophysique fréquent et bien identifiable de la première discontinuité « conducteur sur résistant », peut généralement correspondre à plusieurs cas stratigraphiques qui ne sont pas toujours discernables.

Ainsi, le premier résistant rencontré par la géophysique n'est pas toujours des calcaires Aaléniens ou Domériens, et notamment, dans le centre des synclinaux, où ces calcaires sont parfois très profondément effondrés, sont remplacés par des marno-calcaires, attribués à des formations postérieures (ex : forages IRE 1495/48).

La coupe présentée sur la Figure 13, sur laquelle elle a été reporté, à titre indicatif, les deux interprétations successives qui ont été faites par la prospection géophysique et par forages mécanique, montre bien l'indétermination qui subsiste, en structure profonde, dans la mesure où les niveaux résistants, ayant donné le « signal » électrique, sont mal identifiables ; on voit bien que, les résistants rencontrés dans les fronts des bassins synclinaux ne sont pas ceux rencontrés au centre de ces bassins.

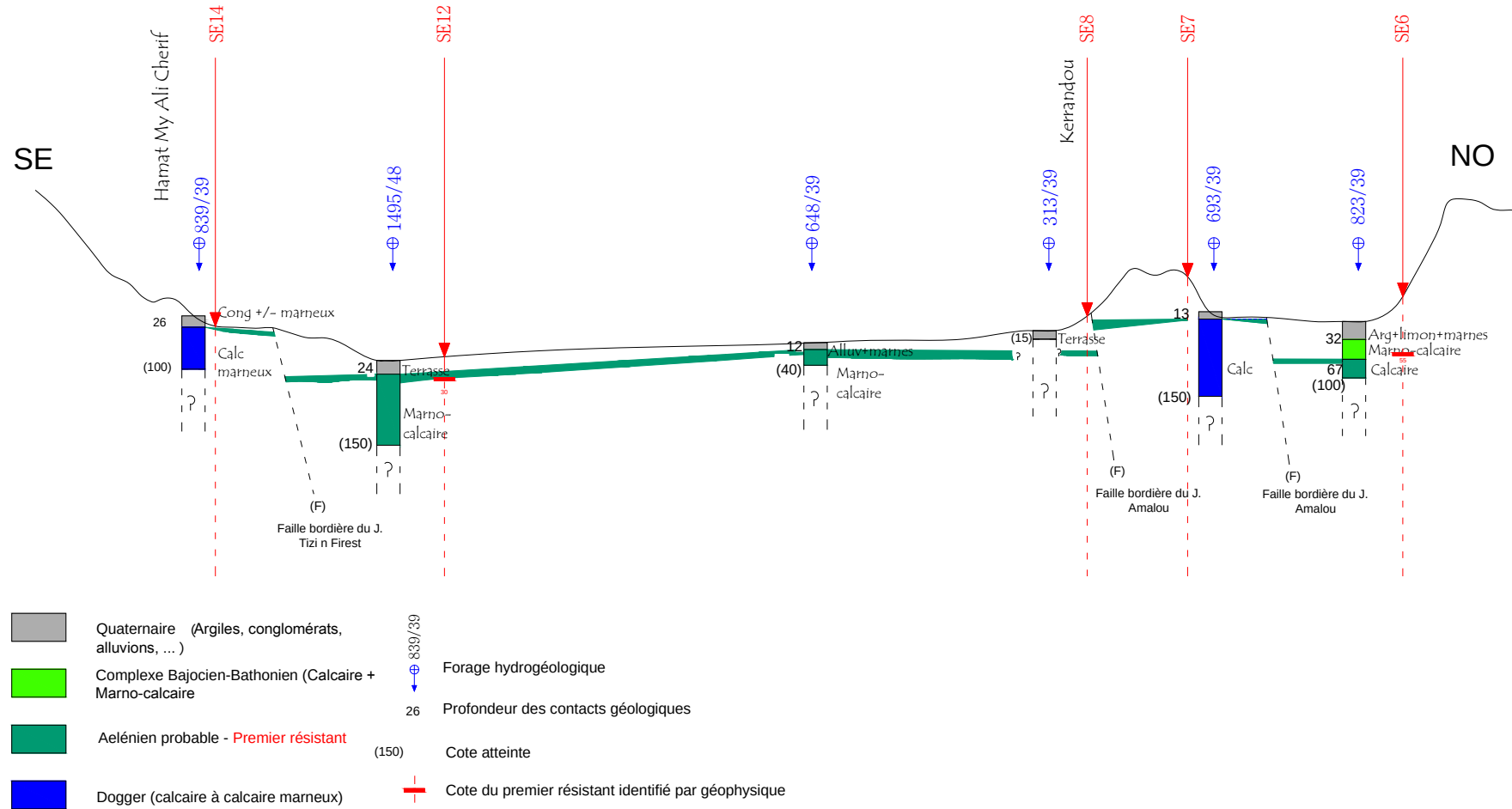


Figure 13 : Exemple de difficultés d'interprétation de la géophysique dans le Haut Atlas central (coupe géo-électrique RG IV)

2.2.4 Schéma géologique conceptuel

Malgré la présence des séries complexes, qui révèlent en outre d'importantes variations latérales de faciès et de puissances, une interprétation structurale synthétique a pu être réalisée sur l'ensemble de la zone, en vue de la délimitation des principales unités, indispensables à la compréhension hydrogéologique.

Les premières études structurales réalisées dans la zone remontent aux années 70. Depuis, le Haut Atlas est l'objet de très nombreuses études structurales (Mattauer et al., 1977 ; Dresnay, 1975, 1979 ; Warne, 1988 ; Warne et al., 1988 ; Laville, 1985 ; El Kochri, 1996 ; Souhel, 1996 et El Harfi et al., 2006). Suite à ces travaux, plusieurs modèles géologiques ont été proposés pour expliquer la formation des bassins jurassiques du Haut Atlas : Mattauer et al. (1977) ont proposé un modèle de formation des bassins par rifting à jeux de failles à composantes normales et décrochantes ; Ces auteurs considèrent les failles NE-SW comme des structures qui délimitent des bassins intracontinentaux en transtension.

En se basant sur la description de plusieurs coupes sédimentologiques et biostratigraphiques locales, Dresnay (1975, 1979) a proposé un modèle de formation des bassins atlasiques par rifting symétrique, liée au fonctionnement de failles normales conjuguées, d'orientation E-W, générées par des contraintes extensives, orientées N-S (Dresnay, 1975, 1979). Selon le même auteur, cette dynamique a conduit à la formation de blocs basculés, observables depuis les bordures Nord et Sud atlasiques jusqu'aux bassins profonds au centre du Haut Atlas.

Warne (1988) et Warne et al. (1988) ont proposé un modèle d'extension dissymétrique. Selon un transect N-S, le Haut Atlas est subdivisé en sept segments structuraux interprétés comme des blocs basculés, et reliés en profondeur à une grande faille de détachement crustal, orientée vers le Nord. Cette faille s'enracine dans le socle paléozoïque à une vingtaine de kilomètres de profondeur.

El Kochri (1996) a proposé un modèle d'extension oblique sous l'action des failles normales et des failles de transfert (extension dissymétrique), il considère le Haut Atlas comme une zone de fractures hercyniennes ou plus anciennes, qui jouent en cisaillement sénestre dans un régime extensif. La direction des failles présente dans ce cas, un angle fort avec la direction d'extension maximale, ce qui explique la présence à la fois de blocs basculés induits par les failles normales et des mouvements horizontaux sur les failles de transfert.

Il apparaît que de nombreux modèles ont donc été développés pour expliquer les modalités de formation des bassins hauts atlasiques. Néanmoins, ces modèles ne permettent pas fournir

suffisamment d'explications notamment sur le mode de remplissage de ces bassins, leurs géométries et la mise en place des sédiments à l'intérieur de ces bassins. Le modèle proposé par Mattauer et al. (1977) présente un cadre général de structuration à l'échelle de l'ensemble du Maroc, il ne traite aucun des aspects sédimentologiques et il ne fournit pas d'explications quant au remplissage des bassins du Lias et du Dogger (S. Sarih, 2007). Le modèle proposé par Dresnay (1975, 1979) ne donne aucune explication quant aux géométries des bassins. Le modèle proposé par Warne (1988) et Warne et al. (1988) n'explique pas le comportement latéral d'une même structure, et de ce fait ce modèle reste à vérifier à l'échelle de l'ensemble du Haut-Atlas (S. Sarih, 2007). Le modèle proposé par El Kochri (1996) ne fournit pas suffisamment d'explications sur le mode de mise en place des sédiments et sur l'architecture des dépôts en réponse à la structuration préexistante.

Malgré ces incertitudes et lacunes, ces modèles se sont affinés au cours du temps, et permettent de rendre compte des mécanismes à l'origine des bassins hauts atlasiques, comme celui de Laville (1985), qui a permis d'expliquer de façon cohérente, la coexistence et le synchronisme en même temps des déformations en compréhension et en distension (Laville et al., 1977 ; Fraissinet et al., 1988 ; Stets et Wurster, 1982).

Laville (1985) a expliqué la formation des bassins du Haut Atlas par décrochement. Dans ce cas, l'ensemble des failles forment des bassins losangiques en pull-apart contrôlés par des mouvements décrochants senestres (Figure 16), il s'agit d'un assemblage de deux structures synsédimentaires : des larges dépo-centres qui correspondent à des bassins subsidents à géométrie synclinale et les rides qui les bordent (Figure 16). Les rides majeures, orientées NE-SW et disposées en relais alternants, forment le plus souvent des structures en fleur positive, caractéristiques des décrochements en compression ; les rides transverses correspondent à des plis et des hauts fonds (Edgard Laville et Bouazza Fedan, 1989).

Le premier cas des rides forment des anticlinaux, très étroits, dont l'édification au cours de la sédimentation jurassique se marque sur leurs flancs, soit par des réductions d'épaisseur importantes, par des brèches intraformationnelles, par des structures gravitaires et même par des discordances angulaires locales.

C'est la seule manière pour expliquer la présence forte curieuse de couches d'âge identique, de très fortes épaisseurs dans le centre des bassins losangiques, bien connus par les sondages électrique, et qui se réduisent à une étonnante minceur sur les crêtes anticlinaux voisins qui les bordent immédiatement.

Cette tectonique est presque généralisée sur l'ensemble de la zone d'étude et elle est jouée en bassins effondrés en donnant naissance à une structure en «Blocs basculés » ; la photo 2, la Figure 14 et la Figure 15 montrent, quelques indices structuraux et sédimentaires de ce type de structures très particulières, qui affectent les dépôts liasiques et du Dogger. Ainsi (A. El Kochri, 1996) a montré une succession de blocs basculés, constitués de dolomies et des calcaires liasiques et du dogger, parfois larges de quelques centaines de mètres ; ils se succèdent « en marches d'escalier » à la faveur des rejets des failles successives (Figure 14).

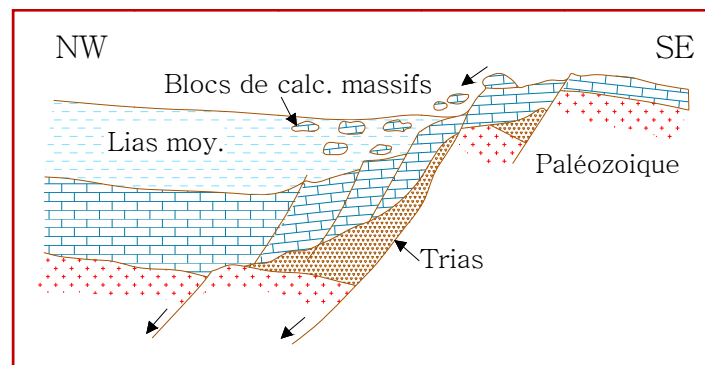


Figure 14 : Coupe interprétative dans la région de Fom Zaabel montrant le changement de faciès et d'épaisseur des blocs basculés d'âge liasique (d'après A. El Kochri, 1996 ; modifiée).

Sarih (2007) a pu observer les mêmes phénomènes, dans la région de Fom Zaabel avec des épaississements en éventail vers l'ONO et biseautage vers l'ESE des dépôts sinémuriens-pliensbachiens (Photo 2). Cette tectonique cassante et synsédimentaire est caractérisée par des effondrements successifs de panneaux, se conjugue aussi parfois avec des mouvements de tectonique plus souple, qui a engendré de forts pendages de couches (S. Sarih, 2007).



Photo 2 : Epaississement de Fom Zaabel en éventail et biseautage des dépôts sinémuriens-pliensbachiens (S. Sarih, 2007)

Desney a pu montrer en 1979 que l'épaisseur et le faciès des dépôts liasiques et du Dogger, changent en allant des bordures sud de la chaîne haute atlasique vers le centre, en mettant une structure sous forme de blocs basculés (Figure 15).

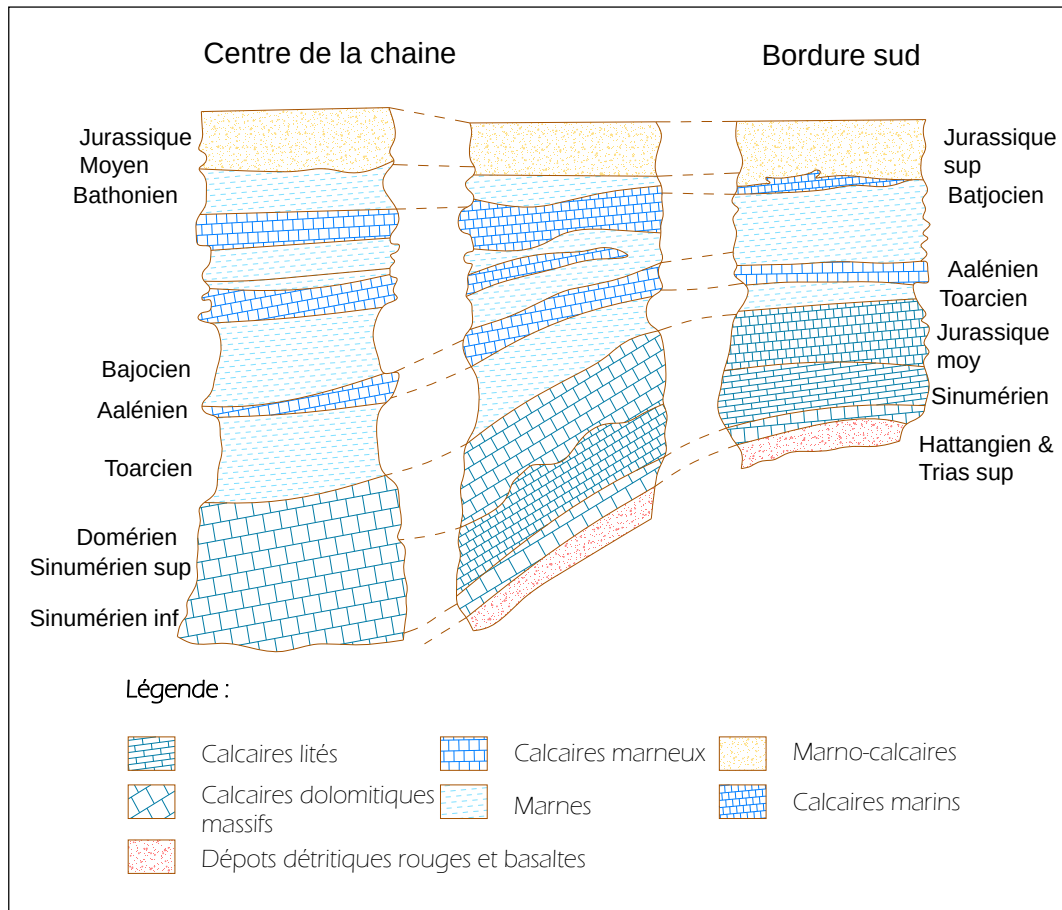


Figure 15 : Stratigraphie simplifiée montrant des variations de faciès et d'épaisseurs de la bordure sud vers le centre du Haut Atlas (d'après Du Dresnay, 1979, modifiée)

Ces figures permettent ainsi à la fois d'imaginer la structure tectonique que doivent présenter les bassins losangiques du Lias et du Dogger en blocs basculés, et d'évaluer les difficultés qui se présentent parfois pour établir la corrélation entre deux forages, même voisins, dans une structure aussi hachée. Cette structure en panneaux de calcaires et de dolomies, effondrés avec des failles de rejets importants, parfois de plus de 100 mètres, noyés sous un recouvrement pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres de marnes ou marno-calcaires, constitue la géométrie la plus probable des principaux aquifères de la zone (Figure 16).

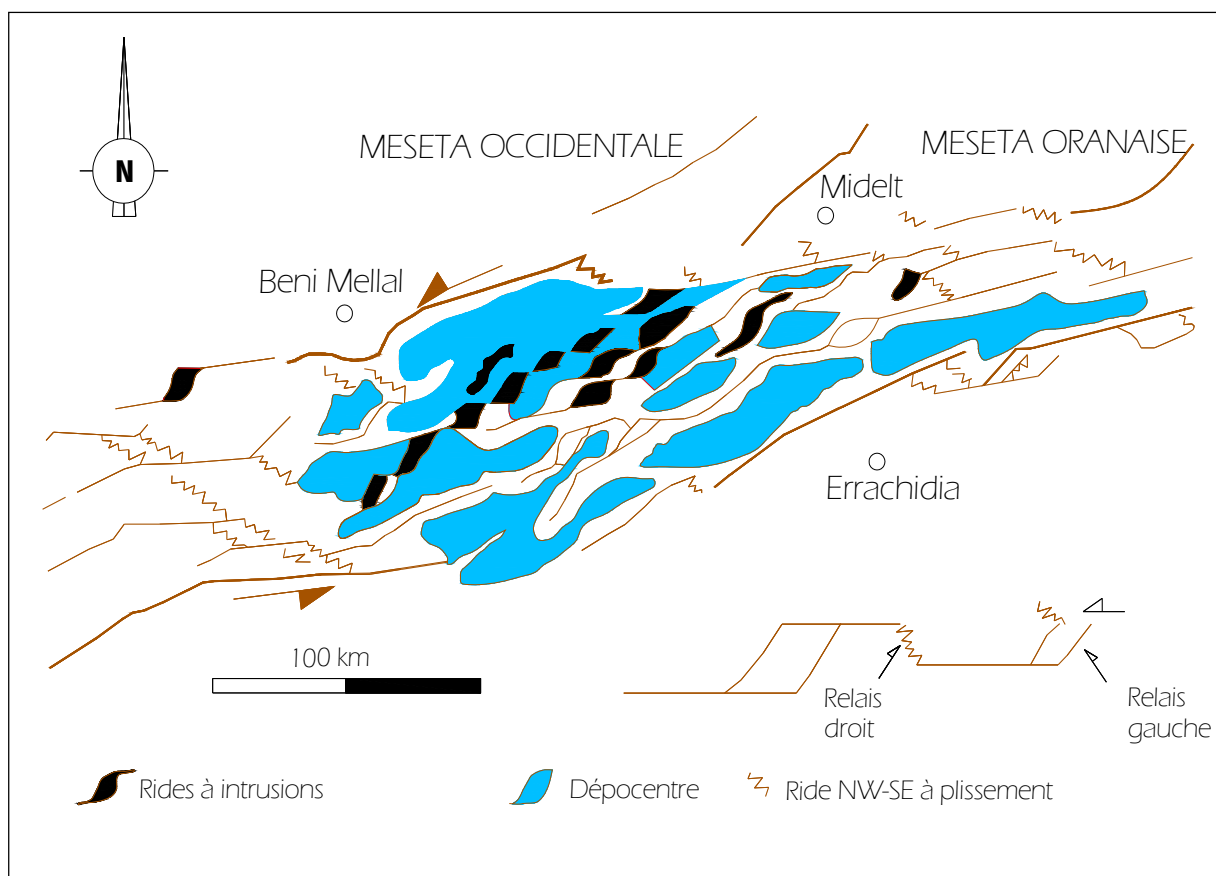


Figure 16 : Modèle retenu de décrochement à bassins losangiques (Laville, 1985-1988)

Il est clair d'après cette analyse que la fracturation joue un rôle primordial dans l'individualisation des différents bassins de la zone, d'où la nécessité de cartographier en détail les fractures et les accidents régionaux ayant un rôle déterminant dans la compréhension hydrogéologique de chaque unité aquifère.

2.3 Cartographie des accidents régionaux

Dans un premier temps, notre démarche consiste à spatialiser les linéaments susceptibles d'être en relation avec la fracturation à partir des images optiques, puis valider ces linéaments aux moyens des données géologiques disponibles (cartes géologiques et structurales, études antérieures, ...). Dans un second temps, d'évaluer leur éventuel rôle dans l'écoulement des eaux souterraines.

Plusieurs types de données ont été utilisées, dont:

- Des données satellitaires : Images Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) de la scène 200-037, datant du 12 avril 2001 (Figure 17), images acquises à partir du site officiel de Landsat : <http://lima.usgs.gov> ;

- Huit cartes topographiques à une échelle de 1/100 000, utilisées notamment pour l'extraction de réseau hydrographique et routier : carte de Qçabi, de Gourrama, de Goulmima, de Rich, de Midelt, de Tounfit, de Tinjdad et de Tinghir ;
- Carte géologique du Haut Atlas au nord de Ksar Es-Souk et de Boudnib au 1/200 000 ;
- Carte géologique du Haut Atlas de Midelt au 1/200 000 ;
- Cartes structurales des travaux antérieurs ;
- Modèle numérique de terrain en format SRTM (30x30) couvrant toute la zone d'étude.

Les principales caractéristiques des images satellitaires utilisées sont représentées au Tableau 3.

Tableau 3. Caractéristiques des images Landsat ETM+ utilisées (LIMA image provided at the <http://www.lima.usgs.gov> web site, consulté le 13/09/2016)

Plate-forme	Capteur	Résolution spatiale en (m)	Cycle (jours)	Altitude (Km)	Bandes	couverture (Km)	Date de prise de vue
LANDSAT 7	ETM+	30 (1, 2, 3, 4, 5, 7). 60 (TM6). 15 (TM8)	16	705	7+1 Pan	185x185	12-04-2001

Vu le caractère varié des traitements requis, plusieurs logiciels ont été utilisés. Erdas Imagine, version 9.2 et Envi 3.5 qui ont servi pour le traitement des images satellitaires. LinWin a permis de réaliser l'analyse statistique du réseau de fractures et ArcGis10.0 pour l'extraction des linéaments et les données issues des cartes topographiques et géologiques.

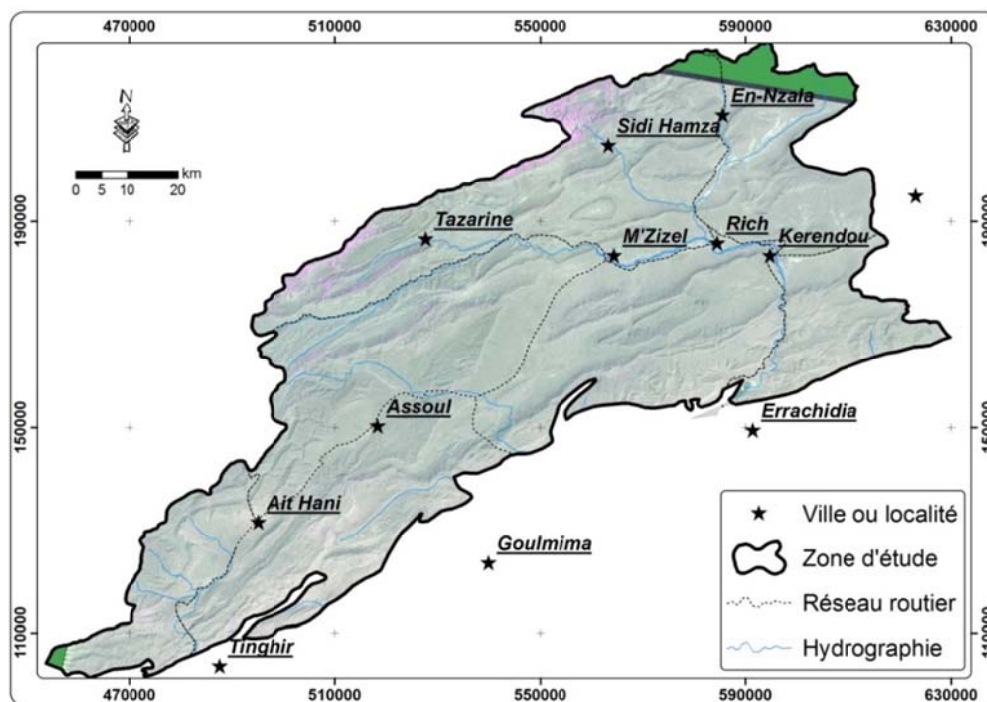


Figure 17 : Images Landsat ETM+, en vraies couleurs 321, couvrant la zone d'étude (<http://www.lima.usgs.gov> web site, consulté le 13/09/2016)

2.3.1 Méthodologie de traitement

De nombreux traitements ont été effectués lors de cette étude (Figure 18). Le détail est expliqué ci-dessous.

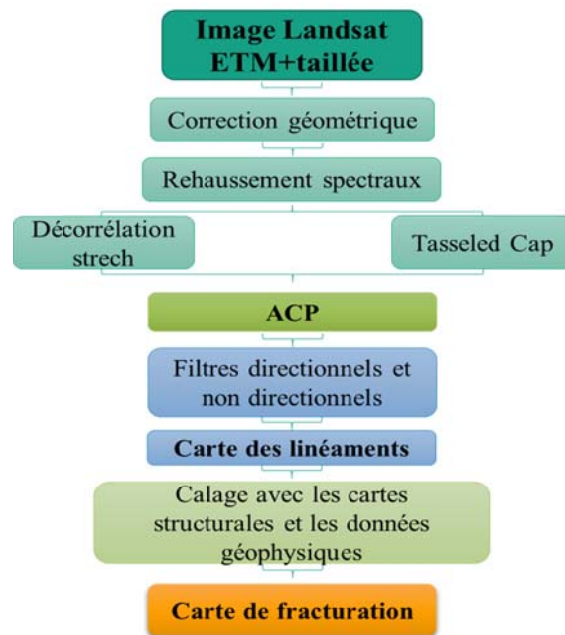


Figure 18 : Organigramme de traitement de l'image satellitaire Landsat ETM+

1) Correction géométrique :

Au cours de l'enregistrement des images par les capteurs, celles-ci sont sujettes à des déformations causées par la courbure de la terre, la variation d'altitude du sol, la réfraction atmosphérique, les erreurs des systèmes de mesure et les mouvements de la plate-forme, (Bonn & Rochon, 1992 ; Yesou et al., 1993 ; Savané et al., 1995 ; Kouamé et al., 1999). Ceci implique la réalisation des corrections géométriques afin de ramener l'image à une réalité planimétrique. Il s'agit de redresser l'image satellitaire par rapport à une carte topographique afin de pouvoir les superposés selon des points de contrôle appelés GCP.

Une transformation de la projection cartographique de l'image Landsat est aussi appliquée selon la projection Lambert conforme conique zone 1, ellipsoïde de clarcke 1880 et le système géodésique de Merchich.

2) Rehaussements spectraux

- + Décorrélacion strech : Afin d'améliorer le contraste et l'aspect visuel de l'image Landsat à traiter, la technique nommée "Stretching linéaire" ou étirement de l'histogramme a été appliquée. Elle consiste à répartir les fréquences d'apparition des pixels sur la largeur de l'histogramme (Oberg, 1992). Il s'agit d'une modification de l'histogramme de telle manière à répartir les intensités sur l'échelle des valeurs disponibles. Ceci revient à étendre l'histogramme afin que la valeur

d'intensité la plus faible soit à zéro et que la plus haute soit à la valeur maximale (Kouamé et al., 1999).

- + Tasseled Cap : il s'agit d'un outil utile pour comprimer les données spectrales dans trois bandes associées aux caractéristiques physiques des objets (Crist, E. P., & Cicone, R. C., 1984). Cette transformation multispectrale consiste à déterminer une typologie des états de la surface en calculant trois néo-canaux par une combinaison linéaire des canaux Landsat TM+. Les trois néocanaux "Tasseled-cap" sont : Brightness (brillance des sols), Greenness (verdeur de la végétation) et Moisture (humidité).

3) Analyse en composantes principales (ACP)

La forte corrélation des bandes originales de l'image satellitaire utilisée ne permet pas d'extraire de manière efficace certains linéaments. L'information contenue dans plusieurs bandes, parfois hautement corrélées, provoque une redondance des données, d'où la nécessité de compresser l'information de plusieurs bandes dans un nombre plus restreint de bandes (Duby C & Robin S, 2006). Celles-ci représentent généralement jusqu'à 97% de la variance totale de l'ensemble des données originales, (La Cicatrice D, 2012). C'est une technique efficace pour accentuer une image multispectrale à des fines interprétations géologiques (Biémi et al., 1991).

Les "nouvelles" bandes résultantes de cette compression statistique sont appelées composantes. Ce procédé vise à maximiser (statistiquement) la quantité d'information (ou variance) des données originales dans un nombre restreint de composantes.

Le choix du nombre de composantes principales (CP) à conserver, constitue l'étape la plus importante de l'Analyse en Composante Principale (ACP). La matrice de corrélation résultante (Tableau 4) montre une forte corrélation entre les sept bandes de l'image Landsat. L'ACP a été réalisée à partir de l'image TM+ brute afin de s'affranchir des redondances et d'améliorer le contraste dans l'image.

Tableau 4. Matrice de corrélation des bandes brutes Landsat ETM+ de 2001

	ETM1	ETM2	ETM3	ETM4	ETM5	ETM7
ETM1	1	0.090261	0.058779	0.016696	0.011636	0.005844
ETM2	0.090261	1	0.651206	0.184973	0.128915	0.064742
ETM3	0.058779	0.651206	1	0.284047	0.197964	0.099419
ETM4	0.016696	0.184973	0.284047	1	0.696941	0.350008
ETM5	0.011636	0.128915	0.197964	0.696941	1	0.502206
ETM7	0.005844	0.064742	0.099419	0.350008	0.502206	1

La matrice de corrélation ci-dessus, montre une forte redondance de l'information contenue dans l'image brute Landsat ETM+ (Les bandes brutes ETM+ sont fortement corrélées). Il est nécessaire alors de décorréler ces bandes, en comprimant les informations sur un nombre réduit de bandes.

Les six canaux ETM+ 1, 2, 3, 4, 5 et 7 sont toutes à une résolution de 30 m, exceptés les canaux ETM+6 (1), 6 (2) qui ont une résolution de 60 m et la bande panchromatique qui a une résolution de 15 m. Pour l'ACP, seuls les canaux qui ont une même résolution sont retenus.

Les composantes principales ont été donc calculées à partir de 6 bandes spectrales TM+. Compte tenu de la résolution spatiale de la bande thermique TM6 (120 m), elle a été exclue parce que sa résolution est inférieure à celle des autres bandes (30 m). Les calculs statistiques des composantes principales montrent que la première composante (CP1) représente près de 99% de la variance totale de l'ensemble des 6 bandes de l'ETM+ (Tableau 4). Cette CP1 sera par la suite rehaussée par des fonctions linéaires permettant d'augmenter le contraste. L'image résultante est représentée sur la Figure 19.

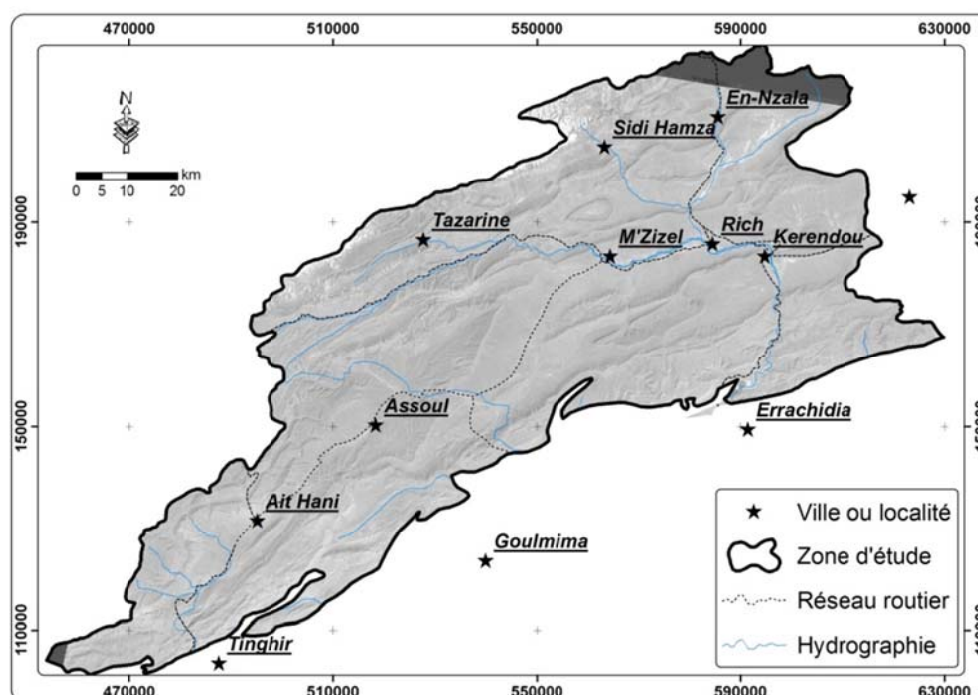


Figure 19 : Image CP1 issue du traitement de l'image ETM+ - Hauts bassins de Ziz et Rhéris

4) Rehaussement des linéaments par filtrage

Le filtrage est une technique visant à éliminer le bruit contenu dans les images satellitaires. Il permet d'améliorer la qualité visuelle de l'image afin de faciliter son interprétation (Laghouag M.Y, 2011). Ces filtres sont utilisés pour identifier les linéaments correspondant aux discontinuités structurales.

Dans ce travail, les filtres directionnels de Sobel ont été appliqués sur l'image Landsat ETM+ précédemment traitée par analyse en composante principale (Laghoug M.Y, 2011). Pour une étude structurale à une échelle régionale comme le cas de la présente étude, il convient d'appliquer des filtres de 3x3 ou 5x5 aux néo-canaux ACP. En tenant compte la dimension de la zone d'étude, une fenêtre de convolution de 3x3 a été retenue pour les linéaments majeurs et les structures plus fines et cela pour accentuer les discontinuités structurales et pour faciliter la discrimination des linéaments.

Les filtres directionnels qui sont présentées au Tableau 5 ont été conçus pour faire ressortir ou masquer les caractéristiques spécifiques de l'image en se basant sur leur fréquence liée à la texture (Himiyari et al., 2002).

Le rehaussement a été effectué selon quatre directions E-O, N-S, NO-SE, NE-SO, à cause du fort contraste obtenu dans les images (Figure 20). De ce fait, tous les filtres obtenus des quatre directions ont été rassemblés dans un seul fichier qui correspond à tous les linéaments obtenus par la technique de filtrage directionnel.

Au final, cinq cartes de linéaments par la technique de filtrage directionnel ont été obtenues (Figure 20). Une carte pour chacune des quatre directions utilisées, et une cinquième qui correspond à la somme des filtres obtenus par la technique de filtrage. Cette dernière carte est fusionnée avec celle des linéaments obtenus par la technique d'analyses en composante principale en donnant naissance à la carte des linéaments totaux qui sera étudiée dans le présent travail (Figure 21).

Tableau 5. Filtre directionnel (3x3) de Sobel

Direction E-O			Direction N-S		
-1	0	1	1	1	1
-1	0	1	0	0	0
-1	0	1	-1	-1	-1
Direction NE-SO			Direction SE-NO		
0	1	1	-1	-1	0
-1	0	1	-1	0	1
-1	-1	0	0	1	1

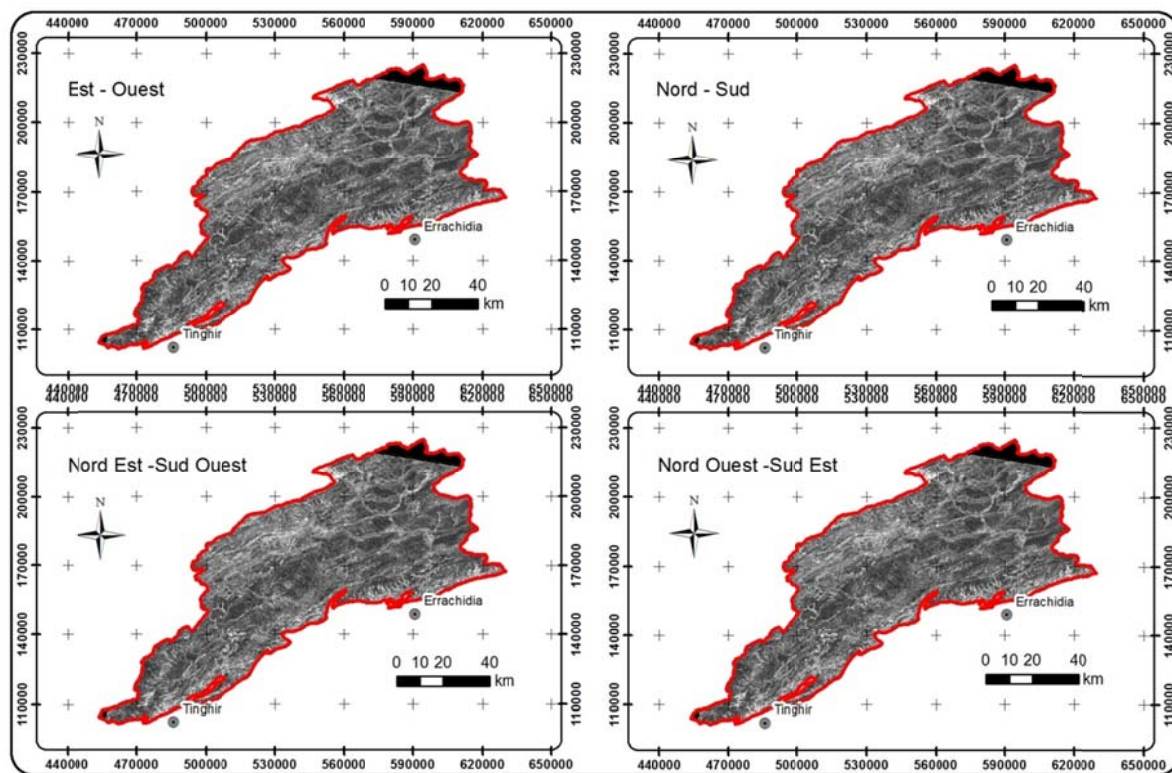


Figure 20 : Image CP1 couvrant la zone d'étude avec les filtres de direction E-O, N-S, NO-SE, NE-SO rehaussant respectivement les accidents N-S, E-O, NE-SO et NO-SE

2.3.2 Extraction et validation des linéaments

Les traitements et filtrages réalisés précédemment ont eu pour effet d'accentuer et de faciliter la détection des discontinuités-images, permettant ainsi leur levé par simple observation visuelle. Ceci a pour but d'éviter de rajouter des éléments susceptibles d'être des linéaments (ex : route, piste, lignes électriques,...etc). Seuls les linéaments d'origine structurale ont un intérêt dans cette étude.

La cartographie de ces linéaments est réalisée en traçant directement les structures linéaires sur les bandes initiales transformées (filtrées ou issues de l'ACP).

Les linéaments tracés sur les fonds d'images filtrées sont systématiquement vérifiés sur les linéaments structuraux relevés au cours des travaux antérieurs et sur les linéaments détectés dans les cartes structurales de la zone. Ces linéaments sont également vérifiés par les grandes anomalies structurales détectées par la géophysique (LPEE, 1993).

La Figure 21 présente les linéaments majeurs issus du traitement de l'image.

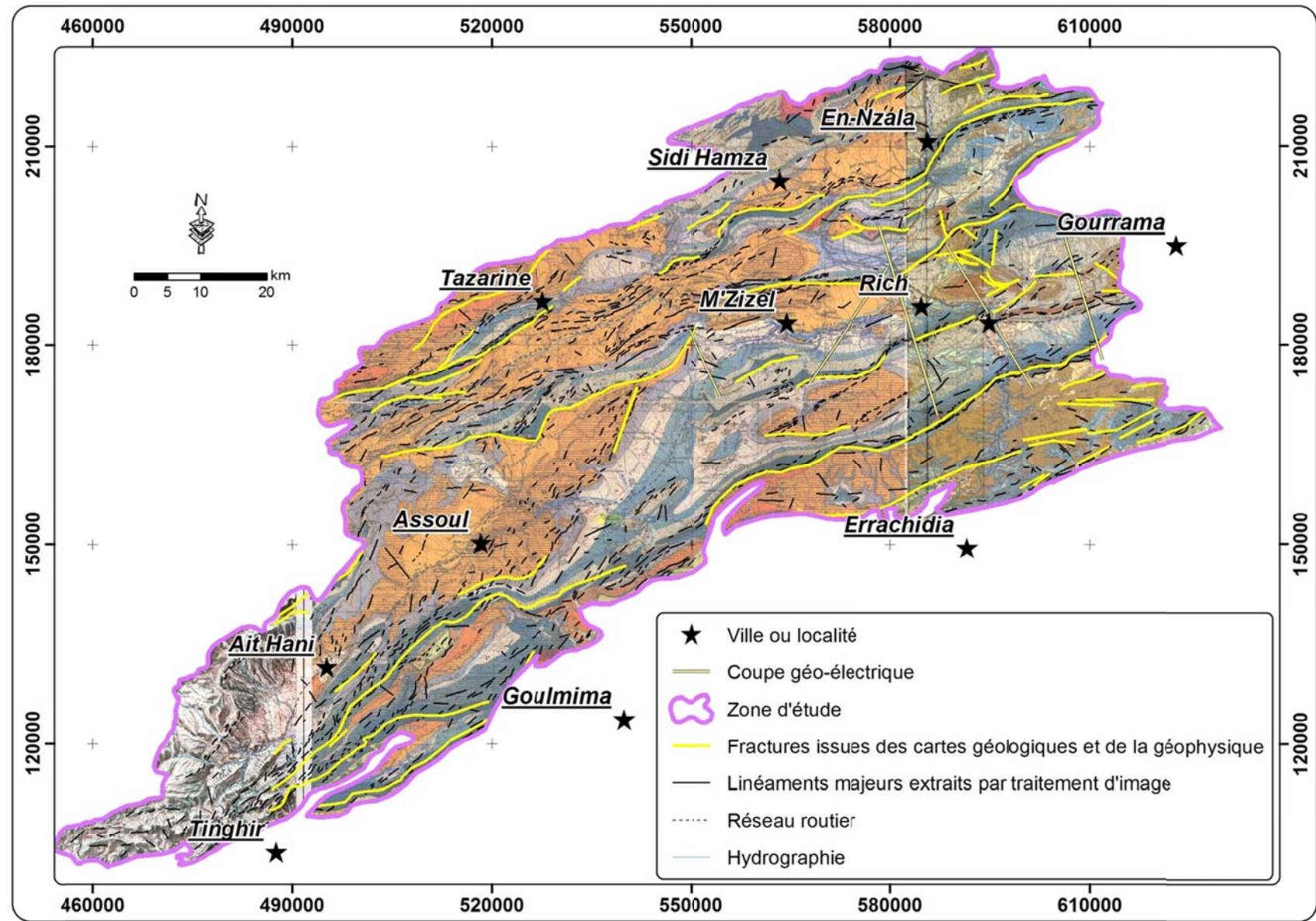


Figure 21 : Carte des linéaments majeurs issus du traitement de l'image Landsat ETM+ rehaussée – Hauts bassins de Ziz et Rhéris

2.3.3 Interprétation

La carte des linéaments résultante illustre les principaux accidents de la zone d'étude. Afin de mieux appréhender la distribution spatiale des failles extraites à partir des images satellitaires, une carte de densité est générée. Cette carte traduit la magnitude de ces failles par unité de surface et permet de mieux analyser la connectivité des éléments structurants dans la zone : la fréquence, l'espacement et les croisements entre failles. Ainsi, une maille de 5 km² est choisie pour le calcul de cette densité. La carte de la densité résultante est représentée sur la Figure 22 selon cinq classes.

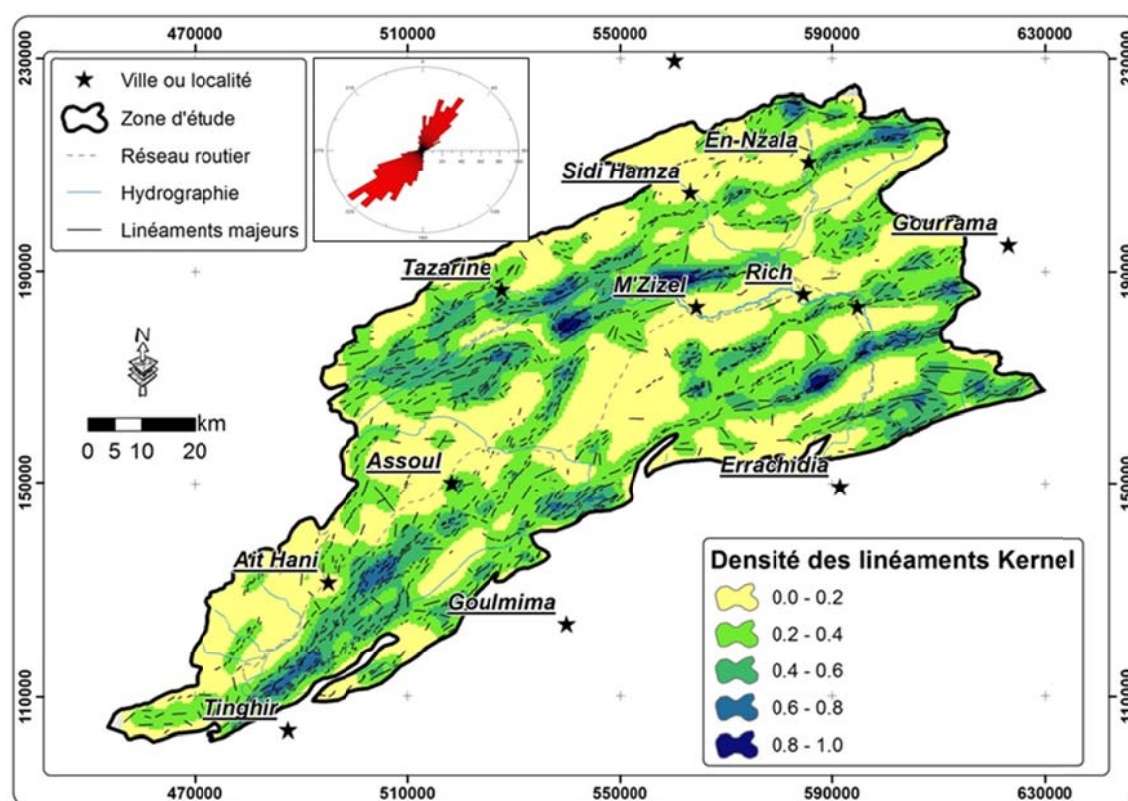


Figure 22 : Densité des linéaments issus du traitement d'image Landsat ETM+ rehaussée – Hauts bassins de Ziz et Rhéris

La Figure 22 montre que :

- + La densité du réseau des failles à l'échelle de la région épouse parfaitement l'organisation des structures géologiques majeures selon une orientation atlasique NE-SO (El Kochri, 1996 ; Laville, 1985) ;
- + Le croisement de cette carte avec les cartes géologiques (Figure 21) montre que les formations liasiques sont celles qui représentent la forte densité, ce sont d'ailleurs ces formations qui occupent les cœurs des anticlinaux, souvent associés à des failles décrochantes (Laville, 1985) ;

+ Les cœurs des synclinaux sont à faible densité, ce sont des formations en général peu rigides où les structures cassantes sont difficiles à être identifiées à partir des images satellitaires. Ailleurs, ce sont en général des fonds plats souvent occupés par des terrains plus récents.

Contrairement aux autres études géophysiques et géologiques faites à grande et à petite échelle qui présentent les failles comme une structure homogène et continue sur des dizaines de kilomètres (Bazin, 1968 ; Choubert et Faure Muret, 1960-1962 ; El Kochri, 1996 ; Laville, 1985), les failles issues de ce traitement se présentent discontinues, sous forme d'un ensemble de segments en relais, de longueur et de directions variables. Cette discontinuité est le résultat du matériel Quaternaire de recouvrement et de la végétation qui cachent partiellement ces failles en surface.

Cette analyse souligne ainsi la grande complexité structurale de la zone, la présence de plusieurs segments de failles, de longueur et de directions variables indique que la zone est souvent individualisée en plusieurs unités hydrogéologiques de caractéristiques et de dimensions variables.

2.4 Conclusion

Le cadre géologique du Haut Atlas central se distingue par une importante complexité géologique et structurale. En dehors de quelques zones réduites ayant un profil relativement monotone, le secteur est sous forme d'une succession de rides anticlinales allongées, et séparées par des zones synclinales, caractérisés par une tectonique cassante ayant joué dans des mouvements discontinus, qui se sont probablement poursuivis pendant toute la sédimentation secondaire, depuis le Trias jusqu'à le Jurassique supérieur (El Kochri, 1996 ; Laville, 1985). Cette configuration a permis le développement de trois (3) complexes aquifères :

- 1) Le Lias inférieur – Domérien : il est continu à l'échelle de toute la zone. Suite à une variation du taux de subsidence et de sédimentation ce niveau est caractérisé par une variation d'épaisseur et de faciès. Dans sa globalité il est épais (jusqu'à 850m) et carbonaté (à dominances calcaires à la base et au milieu de la série, plus fins et gréseux au sommet) ;
- 2) L'Aalénien-Bajocien : il se développe à l'intérieur des bassins synclinaux sous forme des calcaires à corniche, d'environ 160m de puissance en moyen ;
- 3) Le Bajocien-Bathonien : représenté par le membre sommital de la formation de Tazigzaout, logée à l'intérieur du remplissage marneux et marno-calcaire des bassins synclinaux. sa puissance moyenne est relativement similaire à celui du niveau Aalénien-Bajocien (100m).

L'analyse de faciès et structurale souligne la grande complexité de la zone, même à l'échelle de ces réservoirs aquifères identifiés. Les traits structuraux extraits indiquent que ces aquifères sont aussi

hachés, sous forme de blocs basculés avec un changement de faciès et d'épaisseur, tel est le schéma utilisé comme outil de base pour la caractérisation hydrogéologique des aquifères profonds dans cette étude.

Chapitre 3. Hydro-climatologie et évaluation des apports en eaux de surface

3.1 Introduction

L'étude hydroclimatologique est très importante pour la connaissance des facteurs indispensables à l'alimentation des réserves hydriques. L'estimation des caractéristiques hydroclimatiques d'un bassin versant joue un rôle important dans la connaissance du comportement hydrologique des cours d'eau et dans la recharge des aquifères. Les paramètres les plus intéressants dans l'identification du régime d'écoulement sont les précipitations, la température et l'évaporation.

Ces paramètres conditionnent soit la sécheresse, soit l'humidification du milieu. Elles sont utilisées d'une part, pour estimer les différents paramètres du bilan hydrique et d'autre part, pour la connaissance des conditions d'alimentation des réserves en eaux souterraines.

Le contexte hydroclimatique de la zone d'étude est assez bien connu grâce à une dizaine de stations pluviométriques, bien réparties dans l'aire d'étude et disposant des chroniques plus ou moins longues et complètes. Les données climatiques sont enregistrées au niveau des stations d'observation mises en place par l'agence du bassin hydraulique de Guir-Ziz-Rhéris (ABHGZR, 2011).

La localisation des stations exploitées, le type de données ainsi que les chroniques disponibles sont indiqués sur le Tableau 6.

Tableau 6. Stations climatiques exploitées et type de données disponibles (DMN, 2011)

Station	Données disponibles	Serie	X (m)	Y (m)	Z (m)
Amouguer M'Ziel	Précipitation	1970-2011	560000	185300	1478
	Pmax.j	1982-2009			
	Nombre j p	1982-2009			
	Tmax	-			
	Tmin	-			
	Tmoy	-			
	Evaporation	-			
ouia SidiHam	Précipitation	1970-2011	564400	204390	1640
	Pmax.j	1982-2009			
	Nombre j p	1982-2009			
	Tmax	-			
	Tmin	-			
	Tmoy	-			
	Evaporation	-			
Foum Tillicht	Précipitation	1975-2011	579850	192500	1385
	Pmax.j	1993-2009			
	Nombre j p	1993-2009			
	Tmax	-			
	Tmin	-			
	Tmoy	-			
	Evaporation	-			
Foum Zaabél	Précipitation	1970-2011	597450	174650	1220
	Pmax.j	1982-2009			
	Nombre j p	1982-2009			
	Tmax	1982-2009			
	Tmin	1982-2009			
	Tmoy	1982-2009			
	Evaporation	1982-2009			
B.H.Addakhl	Précipitation	1973-2011	588700	154500	1077
	Pmax.j	-			
	Nombre j p	1982-2009			
	Tmax	1982-2009			
	Tmin	1982-2009			
	Tmoy	1982-2009			
	Evaporation	1982-2009			
Tadighoust	Précipitation	1962-2011	543500	140600	1136
	Pmax.j	-			
	Nombre j p	1982-2009			
	Tmax	1982-2009			
	Tmin	1982-2009			
	Tmoy	1982-2009			
	Evaporation	-			
Ait Bouijane	Précipitation	1961-2011	485600	104450	1309
	Pmax.j	-			
	Nombre j p	1982-2009			
	Tmax	1982-2009			
	Tmin	1982-2009			
	Tmoy	1982-2009			
	Evaporation	-			
Tamtetoucht	Précipitation	2003-2011	486600	119900	1771
	Pmax.j	-			
	Nombre j p	2002-2009			
	Tmax	-			
	Tmin	-			
	Tmoy	-			
	Evaporation	-			

3.2 Analyse climatologique et évaluation de la pluie efficace

3.2.1 Analyse des précipitations

Les précipitations constituent la principale « entrée » des principaux systèmes hydrologiques que sont les bassins versants. Elles influencent de manière notoire le comportement hydrologique des bassins versants. Elles sont un des processus hydrologiques les plus variables, d'où la nécessité d'évaluer leur régime.

3.2.1.1 Analyses des précipitations journalières

L'objectif de cette analyse est de déterminer le nombre de jours pluvieux par an dans la zone d'étude, qui sont responsables des différentes crues liées à un excès d'eau. La Figure 23 présente le nombre de jours de pluie enregistrées au niveau de la station de M'Zizel.

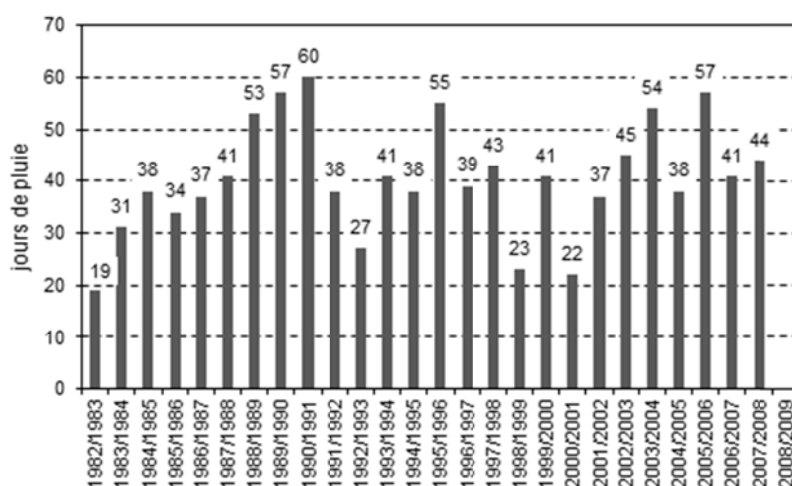


Figure 23 : Extraction des jours pluvieux à l'échelle annuelle, station M'Zizel 1982-2009 (DMN, 2011)

Il ressort de ces histogrammes que, le nombre de jours pluvieux est généralement faible, et il se diffère d'une année à l'autre (années humides et années sèches), ce nombre s'élève à 60 jours en 1990/1991 et 57 jours en 2004/2005 (années humides), contre une diminution à 22 jours en 2000/2001 (année sèche). Cette variation de ces jours pluvieux montre les probabilités de l'apparition des phénomènes d'inondations.

D'un point de vue statistique, sur les 26 années, ou 9490 jours étudiés, seulement 11% des jours sont pluvieux (1053 jours). On note que seulement quatre mois de la chronique étudiée dépassent les 100 jours pluvieux (septembre : 143 jrs ; octobre 128 jrs ; mars:106 jrs et mai : 110 jrs) et appartiennent à la période hivernale et printanière. La période estivale se caractérise aussi par un nombre assez important de jours pluvieux (99 jrs en août). La variation et la faiblesse du nombre de jours de pluie

par an conduit donc à un régime des eaux de surface très irrégulier avec des écoulements sous forme de crues et des eaux non pérennes parfois inexistantes.

3.2.1.2 Analyse des précipitations mensuelles

Le but de cette analyse est d'avoir une idée sur la distribution des pluies à l'échelle mensuelle. En effet la variation mensuelle des pluies permet de mieux comprendre la répartition temporelle des entrées des bassins versants. La Figure 24 présente les histogrammes de la pluie moyenne mensuelle au niveau des stations de Foum Tillicht, Sidi Hamza, Tamtetch, Foum Zaabel et Ait Bouijane.

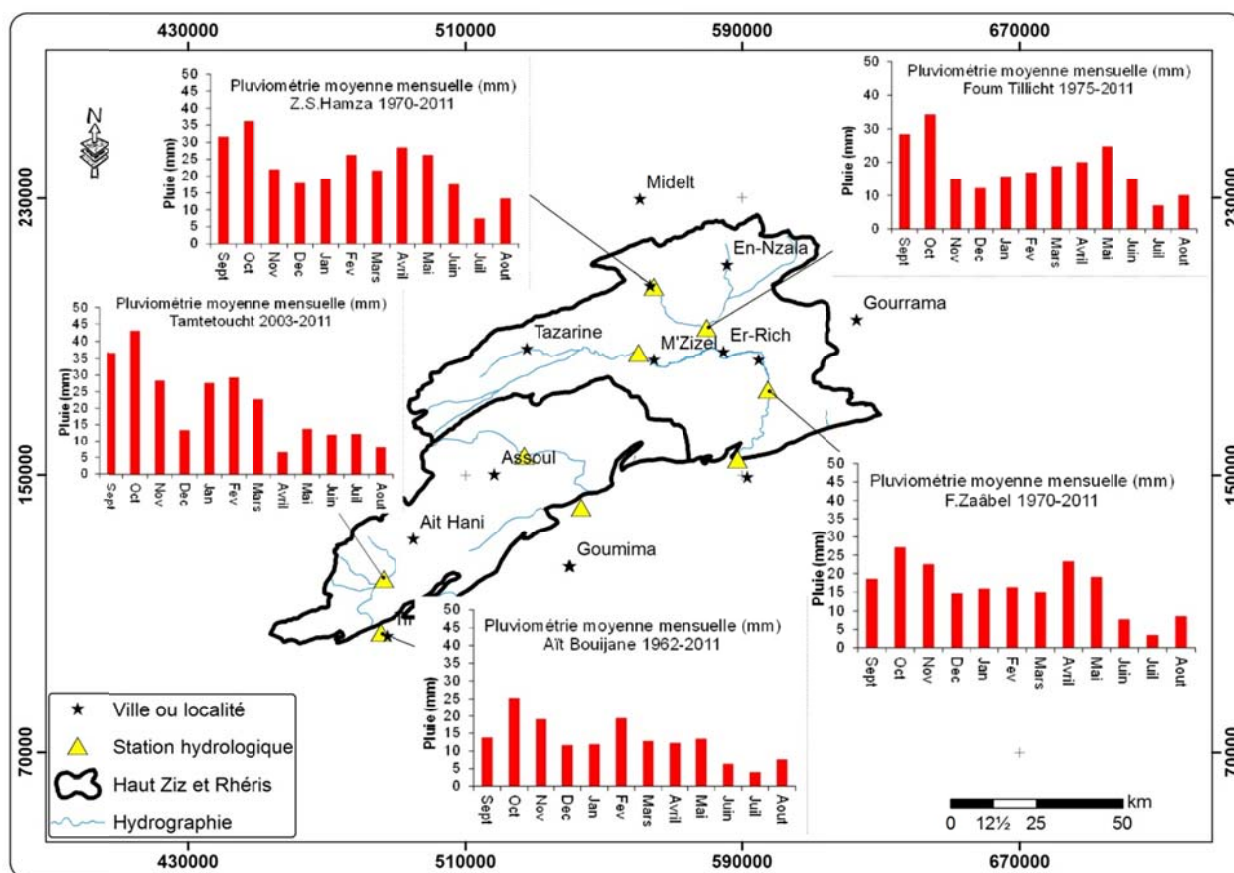


Figure 24 : Histogrammes des pluies moyennes mensuelles des hauts bassins de Ziz et Rhéris (DMN, 2011)

L'analyse de ces données met en évidence une forte variabilité pluviométrique mensuelle. En effet, on peut distinguer quatre périodes distinctes qui contrastent fortement en termes de précipitations (deux maxima et deux minima).

Périodes de septembre - novembre et mars - mai: Ce sont les deux périodes où la pluviométrie locale est la plus forte (45,2 mm à Tamtetch, 36 à sidi Hamza, 34mm à Foum Tilicht), pendant lesquelles, octobre et mai sont les mois les plus pluvieux, au cours desquels, les précipitations sont essentiellement dues à des phénomènes orageux locaux.

- Période de Décembre février et juin-Aout : Les précipitations y sont beaucoup plus faibles que lors de deux autres périodes (6 mm à Tamtetch, 7 à sidi Hamza, 6mm à Fom Tillicht), comme elles peuvent être nulles (0 mm, par exemple : Juillet 1988, 1997, 2011). Au cours de cette période les précipitations sont aussi sous forme des orages.

L'examen de ces données montre que normalement, les premières pluies font leur apparition au mois de septembre, mais il n'est, cependant, pas rare qu'aucune précipitation n'ait lieu jusqu'au mois d'octobre, voire jusqu'au mois de novembre.

3.2.1.3 Analyse des précipitations interannuelles

Le régime interannuel est bien connu en raison d'un nombre suffisant de données d'observations et la rareté des lacunes de mesures. La Figure 25 montre deux exemples d'évolution des précipitations annuelles à la station de Fom Tillicht (a) et à la station d'Ait Bouijane (b), dont la situation est représentée dans la Figure 24.

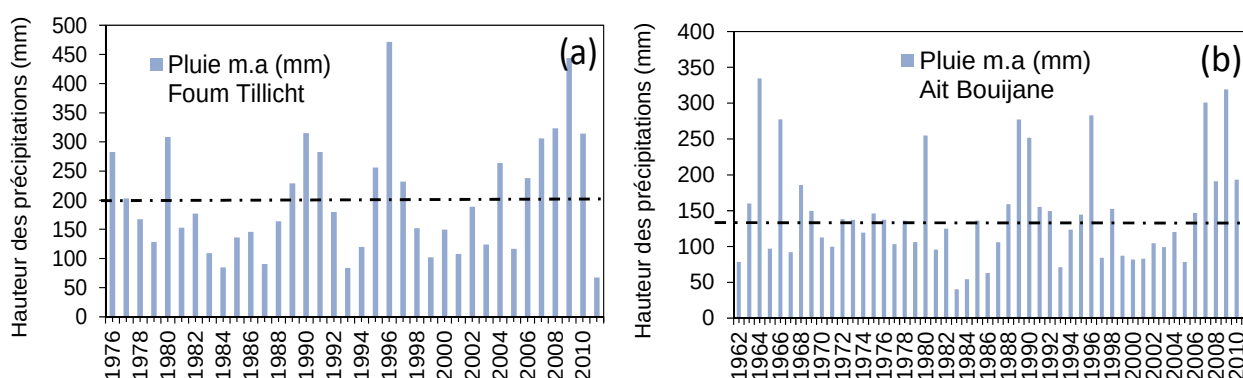


Figure 25 : Evolution de la précipitation annuelle aux stations de Fom Tillicht (a) et d'Ait Bouijane (b), (DMN, 2011)

Il ressort de ces histogrammes qu'aucune périodicité régulière ne semble régir les précipitations : des années pluvieuses, supérieures à la moyenne sont moins fréquentes mais plus intenses et, les écarts annuels par rapport à la moyenne interannuelle sont plus souvent négatifs. Les séries d'années sèches à pluviosité inférieure à la moyenne interannuelle peuvent s'étaler sur 3 à 7 années consécutives (par exemple de 1981 à 1988 pour les deux stations), catastrophiques pour la recharge des nappes et pour l'alimentation des périmètres irrigués atlasiques et de Tafilalt au sud.

3.2.1.4 Répartition spatiale des précipitations

La Figure 26 présente la répartition spatiale des précipitations, elle montre une variabilité spatiale des pluies; Les précipitations diminuent en allant des sommets des montagnes (262mm à Zaouiat Zidi

Hamza) vers les zones moyennes et basses vallées, notamment au Barrage Hassan Addakhil (124mm), à Aït Bouijane (144mm) et à Tadighoust (147mm).

En effet, la hauteur des précipitations augmente en fonction de l'altitude et des reliefs rencontrés. D'une manière générale, la pluviométrie diminue en allant du versant nord du Haut Atlas qui est la zone la plus arrosée vers son versant sud.

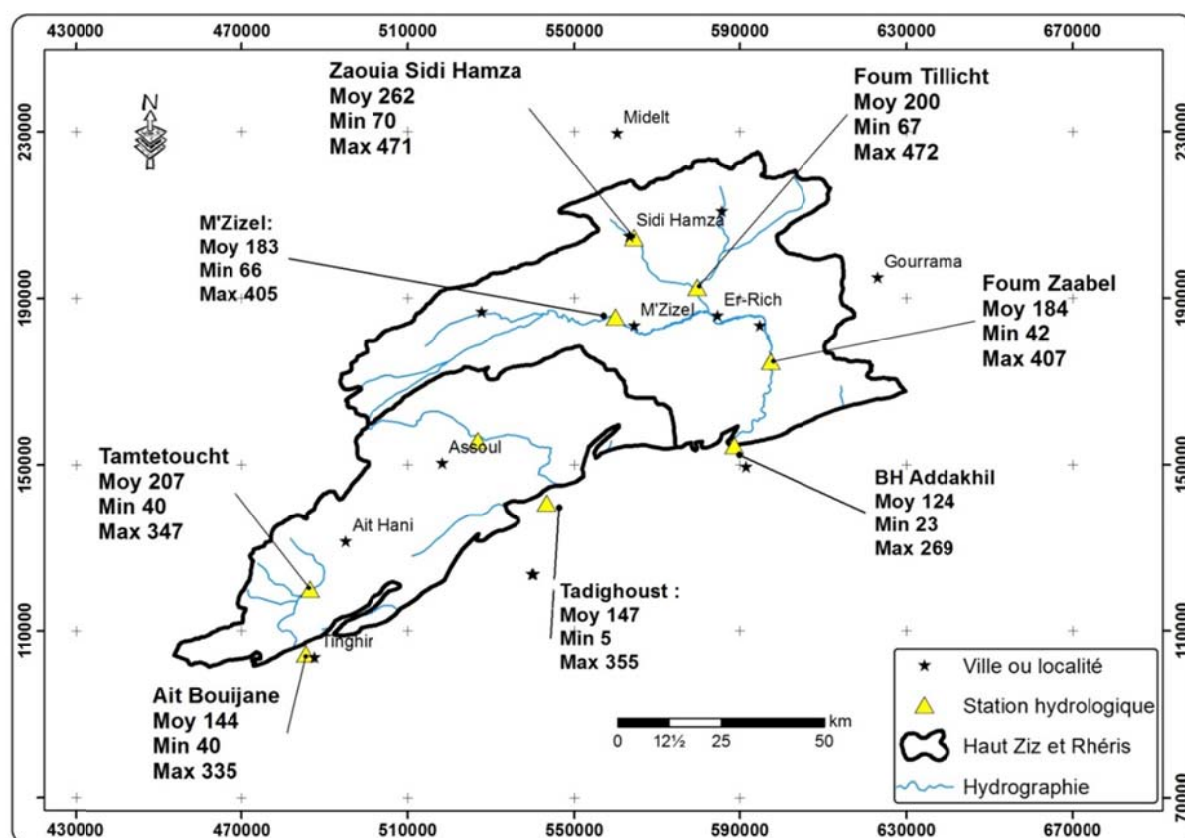


Figure 26 : Evolution spatiale des précipitations annuelles dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris (DMN, 2011)

3.2.2 Analyse des températures et diagramme ombrothermique

Les températures sont un élément fondamental pour caractériser le climat d'un bassin versant. Les températures sont mesurées aux stations de Foum Zaâbel, au Barrage Hassan Addakhil, à Ait Bouijane et à Tadighoust. Les valeurs moyennes mensuelles maximales et minimales sont reportées sur le Tableau 7.

Tableau 7. Températures moyennes enregistrées dans la zone d'étude (DMN, 2011)

Station		Sept.	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Foum Zaâbel (1982-2009)	T°max	35.37	30.29	24.57	20.98	20.28	22.02	25.78	28.79	32.78	37.30	38.87	37.87
	T°moy	24.45	18.43	12.96	8.98	7.88	10.72	13.75	17.31	20.93	25.36	29.89	28.65
	T°min	13.28	8.30	1.97	-0.94	-2.26	0.18	2.89	6.32	9.00	14.49	19.25	16.95
B.H.Addakhil (1982-2009)	T°max	37.35	31.16	25.47	20.84	19.88	22.75	26.80	30.08	34.08	38.66	40.61	40.02
	T°moy	26.07	19.74	14.70	10.63	9.22	11.65	14.94	17.79	22.38	26.41	30.76	30.39
	T°min	15.07	9.57	1.80	1.67	0.78	2.20	4.40	7.22	10.36	15.08	19.47	19.29
Aït Bouijane (1982-2009)	T°max	34.91	29.49	24.49	21.29	20.75	23.07	25.67	28.63	32.56	36.54	38.45	37.58
	T°moy	23.69	17.76	13.16	9.19	8.45	10.60	13.61	16.95	20.72	24.91	25.38	27.60
	T°min	12.92	7.67	2.51	-0.86	-1.31	0.30	2.51	5.98	8.78	13.55	16.64	15.68
Tadighoust (1982-2009)	T°max	37.35	31.26	25.57	21.70	21.32	23.41	27.41	31.16	34.83	39.56	40.45	40.08
	T°moy	25.74	19.75	13.57	9.74	8.75	11.27	15.18	18.42	23.26	28.27	31.35	30.30
	T°min	14.71	8.53	2.63	-0.50	-1.78	0.24	3.50	7.44	10.20	16.49	20.95	18.30

La température moyenne annuelle varie de 7.88°C enregistrée à Foum Zaabel à 31.35°C enregistrée à Tadighoust. Les températures maximales sont élevées pendant les mois chauds de l'été et les températures minimales sont très faibles pendant les mois froids de l'hiver. En effet, les températures présentent de fortes variations saisonnières puisque les valeurs s'échelonnent de -2.26 °C au mois de janvier (Foum Zaabel) jusqu'à plus de 40 °C en juillet (B.H Addakhil), mois le plus chaud. L'élévation des températures est plus forte à partir du mois d'avril pour atteindre des niveaux proches de 31 °C en période diurne de l'été (Tadighoust). On notera que l'amplitude des températures sur la journée est importante et qu'elle est quasi constante toute année, de l'ordre de 22°C.

Le Diagramme Ombrothermique est un élément pratique pour évaluer la durée et l'intensité de la saison sèche pendant l'année (Bagnouls et Gaussen., 1969). Il s'est basé sur la formule $P. = 2 T^{\circ}C$; les mois secs sont définis, quand la courbe des précipitations est située au-dessous de celle des températures moyennes. Ces graphiques permettent de suivre facilement la suite des saisons et l'importance de leur sécheresse. Mais, ils présentent l'inconvénient de ne pas faciliter la comparaison entre les stations.

Deux stations ont été choisies pour l'évaluation de ce paramètre : Foum Zaâbel et Ait Bouijane.

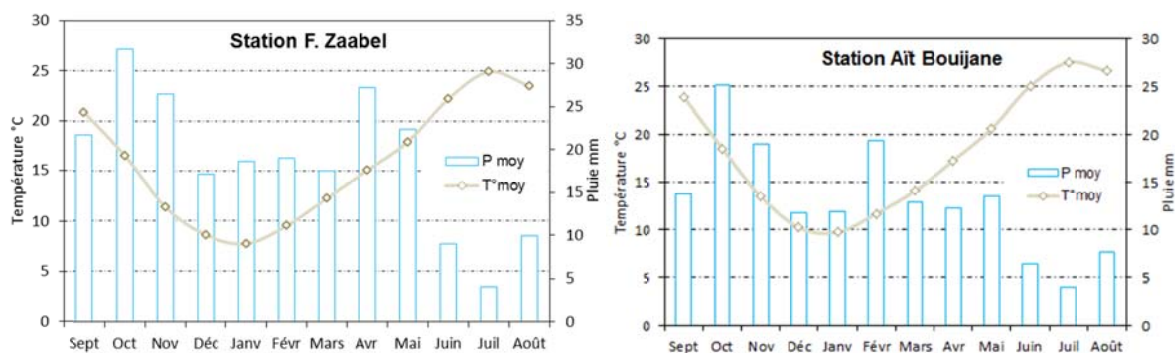


Figure 27 : Diagrammes ombrothermiques de Foum Zaabel et d'Ait Bouijane

D'après ce diagramme, deux saisons bien distinctes peuvent être déterminées :

- + Une saison sèche qui s'étend du mois de mai jusqu'au mois de septembre à la station Foum Zaabel et du mars à septembre à la station Ait Bouijane ;
- + Une saison humide qui s'étale du mois d'octobre jusqu'au mois de mai à la station Foum Zaabel et du mois d'octobre à février à la station Ait Bouijane.

La période humide dure, alors 8 mois dans la partie centrale de la zone d'étude contre 5 mois au sud de celle-ci.

3.2.3 Analyse de l'évaporation

L'évaporation influe beaucoup sur l'état hydrique du sol ; elle dépend essentiellement de la température, de l'humidité et de la vitesse du vent. L'évaporation de la zone d'étude est évaluée à partir des données de la station du Barrage Hassan Addakhil et de la station de Foum Zaâbel, situant dans deux endroits distincts, respectivement au sud et au centre de la zone d'étude. Les données exploitées sont mesurées à l'aide des Bacs. En effet, la zone d'étude est caractérisée par une forte évaporation annuelle, celle-ci varie de 2948 mm à Foum Zaâbel à 3122 mm au Barrage Hassan Addakhil. La Figure 28 (a et b) montre également que l'évaporation des mois de juillet et d'août est très élevée alors que le minimum est atteint au cours des mois de décembre à février.

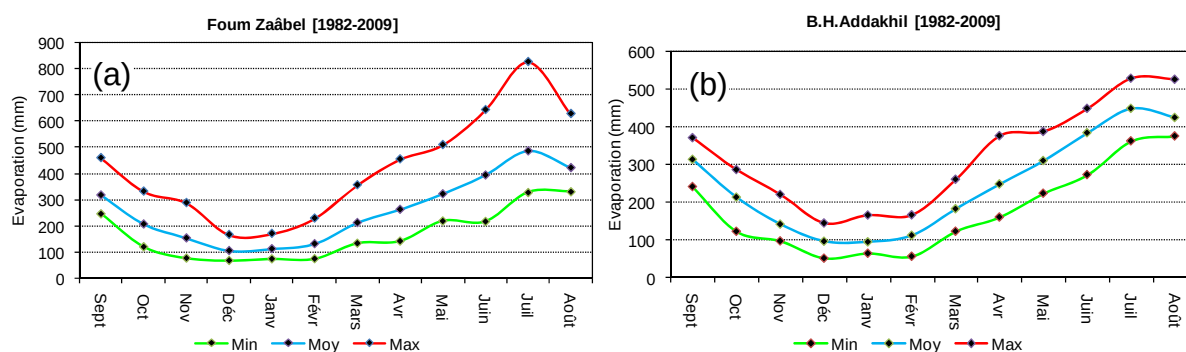


Figure 28 : Répartition annuelle de l'évaporation en mm dans la zone d'étude (DMN, 2011)

A une échelle spatiale, il apparaît que l'évaporation est plus élevée en allant du nord vers le sud de la zone d'étude. Cependant les valeurs enregistrées au niveau du barrage Hassan Addakhil sont influencées par les eaux de la retenue dudit barrage.

A une échelle temporelle, les tendances de l'évaporation dans la zone sont différentes selon la localisation, une hausse de 9 mm/an est enregistrée dans la station de Foum Zaabel tandis qu'une baisse d'environ 50mm est observée à Foum Zaabel.

3.3 Analyse hydrologique et régime des cours d'eau

3.3.1 Introduction

La transformation de la pluie en écoulement (aussi bien superficiel que souterrain) passe par l'intermédiaire du bassin versant. Ce dernier est défini comme « la région qui reçoit les précipitations et, suite aux processus hydrologiques entraînant pertes et retards, les achemine jusqu'à un exutoire » (OMM, 1996).

Outre les conditions climatiques qui gouvernent le fonctionnement du bassin versant, ses caractéristiques physiques influencent le volume (en terme du bilan) et la répartition temporelle (en terme d'hydrogramme) des écoulements (Roche, 1963). Par caractéristiques physiques il faut entendre la topographie, la géologie, la nature et l'occupation du sol, mais aussi la forme du bassin versant dont on conçoit bien qu'elle influence les caractéristiques de l'écoulement résultant d'une pluie donnée (Roche, 1963; Strahler, 1964).

3.3.2 Présentation des cours d'eau et des bassins versants

- **Sous bassins versant du haut Ziz** : L'unité du bassin de Ziz qui sera traitée dans le cadre de cette thèse est celle qui se trouve en amont du barrage Hassan Addakhil dont la superficie est de 4724 km² (Figure 29). Elle est drainée par le cours d'eau principale « Ziz ». Des affluents viennent l'alimenter de part et d'autre, notamment : oued N'zala, oued Sidi Hamza, oued Tazarine, oued N'Igli et oued Talfast. Le Ziz et ses affluents recoupent les axes des structures du haut-Atlas en formant des cluses dites "Foum". Sur la rive droite de Ziz, débouchent plusieurs affluents qui n'atteignent le Ziz qu'en période de fortes crues, tandis que sur la rive gauche, le Ziz reçoit deux importants affluents : l'oued Meski formé par la confluence de plusieurs petits oueds et l'oued Aoufous dont les affluents sont oueds Boubarnous et Rahma ainsi que les sources d'Aoufous qui lui confèrent un régime permanent.

- **Sous bassins versant du haut Rhéris** : L'unité du bassin de Rhéris est celle qui se trouve en amont des stations hydrologiques d'Aint Bouijane et Tadighoust, d'une superficie globale de 3492 km² (Figure 29). Ce bassin est drainé par le haut Rhéris et son principal affluent Tagount. D'autres affluents viennent alimenter ces deux oueds de part et d'autre : oued Bounourg, oued Si Bou Yaacoub et oued Ife. De la même manière, Rhéris et ses affluents recoupent les axes des structures haut-Atlasiques en formant des cluses dites "Foum" (Figure 29).

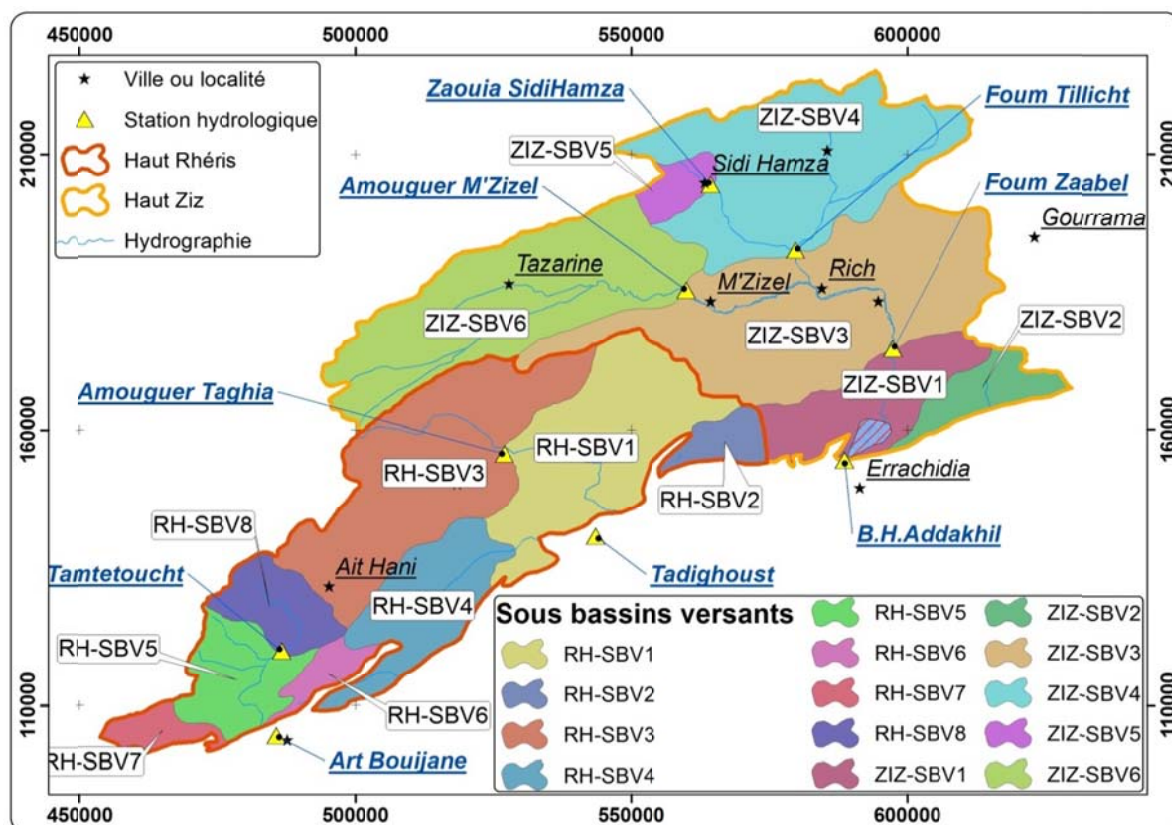


Figure 29 : Sous bassins versants du haut Ziz et Rhéris

Avant de traiter le régime hydrologique des cours d'eau à différents points de leurs parcours, il serait utile de rappeler les caractéristiques morphologiques de leurs bassins versants.

La caractérisation morphologique et hydrométrique des sous bassins du Haut Ziz et Rhéris a été faite en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT), doté d'une résolution de 90 m. Il a été reconstitué par l'intermédiaire d'un SIG pour créer un nouveau MNT avec une équidistance de 30 m pour afficher le détail des bassins versants. Le MNT reconstitué a permis la génération des sous bassins versants, du réseau hydrographique et le calcul par la suite de leurs caractéristiques physiques qui sont récapitulées sur le Tableau 8 . Les stations hydrologiques sont considérées le lieu des exutoires des bassins versants jaugés.

Tableau 8. Caractéristiques physiques des sous bassins du Haut Ziz et Rhéris

BV	SBV	Oued	Station/Exutoire	S (Km ²)	Alt. moy (m)	P (m/m)	IG	TC.moy (heure)
Haut Ziz	ZIZ-SBV1	O. Ziz	B.H. Addakhil	473	1506	0.21	1.47	3.50
	ZIZ-SBV2	O. Meski	-	212	1600	0.24	1.67	2.17
	ZIZ-SBV 3	O. Ziz	Foum Zaabel	1528	1581	0.15	1.64	8.04
	ZIZ-SBV 4	O.N'Zala	Foum Tillilicht	1190	1886	0.18	1.63	5.28
	ZIZ-SBV 5	O.S.Hamza	Zaouiat Sidi Hamza	113	2275	0.34	1.26	1.47
	ZIZ-SBV 6	O.Tazarine	Amouguer M'Zizel	1208	2122	0.27	1.49	5.39
Huat Rhéris	RH-SBV1	Rhéris	Tadighoust	909	1625	0.21	1.58	4.64
	RH-SBV 2	Safsaf	-	130	1712	0.24	1.54	1.78
	RH-SBV 3	Rhéris	Amouguer Taghia	1158	2067	0.25	1.55	5.21
	RH-SBV 4	Alloulif	-	488	1715	0.23	1.63	3.48
	RH-SBV 5	Todra	Ait Bouijane	340	2192	0.29	1.41	2.38
	RH-SBV 6	Tamaïoust	-	102	1837	0.28	1.80	1.42
	RH-SBV 7	talwegs	-	112	2289	0.29	1.66	1.55
	RH-SBV 8	Toudra	Tamtetoucht	253	2182	0.22	1.23	2.68

S : Superficie ; P : Périmètre ; L.E : Longueur des écoulements ; IG : Indice de Graveluis ; Alt. moy : Altitude moyenne ; P. moy : Pente moyenne, TC. moy : temps de concentration moyen

L'examen des courbes hypsométriques de chaque sous bassin permet de calculer les différentiels paramètres caractéristiques tels que la superficie, l'altitude et la pente moyennes, l'indice de Graveluis et le temps de concentration.

Les altitudes moyennes des deux bassins versants sont similaires, celles du haut Ziz sont comprises entre 1506m au niveau de son exutoire du barrage Hassan Addakhil et plus de 2270 m au niveau du bassin d'Amouguer M'Zizel, celles du haut Rhéris sont comprises entre 1625m à Tadighoust et plus 2280m au sous bassin versant RH-SBV7.

La surface étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, elle influence directement les débits et le temps de ruissellement ou d'écoulement. Par comparaisant, le haut Ziz présente une surface 35% plus supérieure que celle du haut Rhéris.

La pente moyenne donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement, donc sur le temps de concentration (tc), et influence directement le débit de pointe lors d'une averse. Généralement les pentes des sous-bassins de Ziz sont relativement inférieures à celles de Rhéris avec des valeurs moyennes, respectivement de 0.23m/m et 0.25m/m.

L'indice de compacité de Gravelius, défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface a donnée des valeurs supérieures à 1 pour l'ensemble des sous bassins versants, donc des formes relativement allongées.

Le calcul du temps de concentration a montré des valeurs entre 1.42 h à 8 h, elle correspond au temps maximal nécessaire au ruissellement en provenance du point le plus éloigné de l'exutoire. Il est claire que ce paramètre dépend plus de la superficie des sous-bassins versants (Tableau 8).

Il ressort de cette analyse que les conditions physiques des bassins du haut Ziz et Rhéris sont relativement voisines, il devient nécessaire d'étudier le régime annuel et interannuel des cours d'eau correspondants afin d'évaluer les apports en eaux de surface.

3.3.3 Régime hydrologique des cours d'eau

Des stations de jaugeage sont installées sur les oueds de Ziz et de Rhéris ainsi que sur certains de leurs affluents. Ces stations font l'objet de relevés réguliers et de jaugeages. Les stations traitées dans ce travail sont au nombre de 9 et correspondent à celles du B.H. Addakhil, de Foum Zaabel, de Foum Tillilcht, de M'Zizel, de Tadighoust, d'Ait Bouijane et de Tadighoust. Leur situation géographique est présentée sur la Figure 29.

3.3.3.1 Débits mensuels

La Figure 30 récapitule les débits moyens mensuels interannuels, observés dans les principaux cours d'eau de la zone.

De façon générale, les débits maximums des cours d'eau sont observés en automne et en printemps et les minimums sont enregistrés en été et en hiver. A l'exception de l'oued Rhéris au niveau de la station de Tadighoust, dont le régime saisonnier est différent, puisque les débits sont maximales en automne et minimales dans le reste de l'année. Le débit mensuel varie de 1 à près de 9 m³/s selon les stations.

D'après les graphes ci-dessous, on peut constater que les cours d'eau de la zone se caractérisent par deux maxima et deux minima par an, correspondant à plusieurs modes d'alimentation. En se basant sur la classification de (Pardé, 1933), le régime hydrologique de ces cours d'eau est complexe.

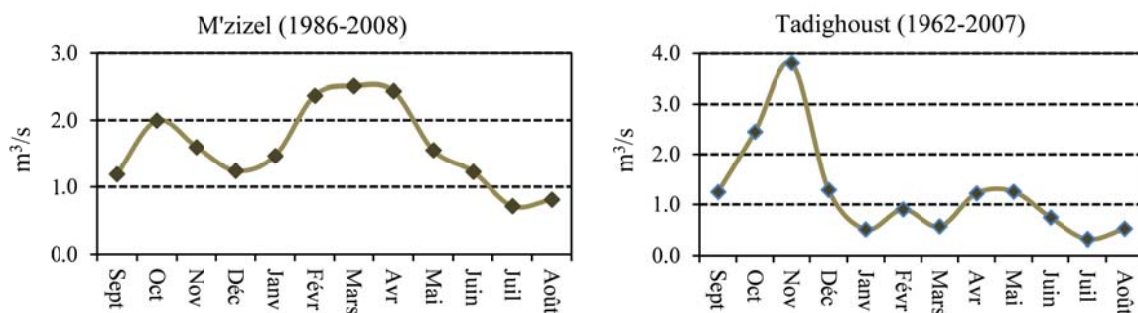


Figure 30 : Débits moyens mensuels observés dans la zone d'étude (ABHGZR, 2011)

3.3.3.2 Débits moyens interannuels

L'analyse des débits mensuels interannuels, montre que le régime des cours d'eau est formé de longues périodes de débits faibles ou inexistantes et de quelques crues parfois violentes (Figure 31,

Figure 32) mais de courte durée et d'occurrence pendant deux saisons de hautes eaux, l'automne et le printemps. L'essentiel des apports en eaux se fait durant ces crues.

Les apports des stations aval (Foum Zaabel avec 4,19m³/s ; Tadighoust avec 1,235m³/s) sont très importants en comparaisant avec ceux des stations amont (M'Zizel avec 1,59m³/s ; F Tillicht avec 2 m³/s) ce qui indique le fort taux de ruissellement des bassins versants, conformément à leurs caractéristiques physiques.

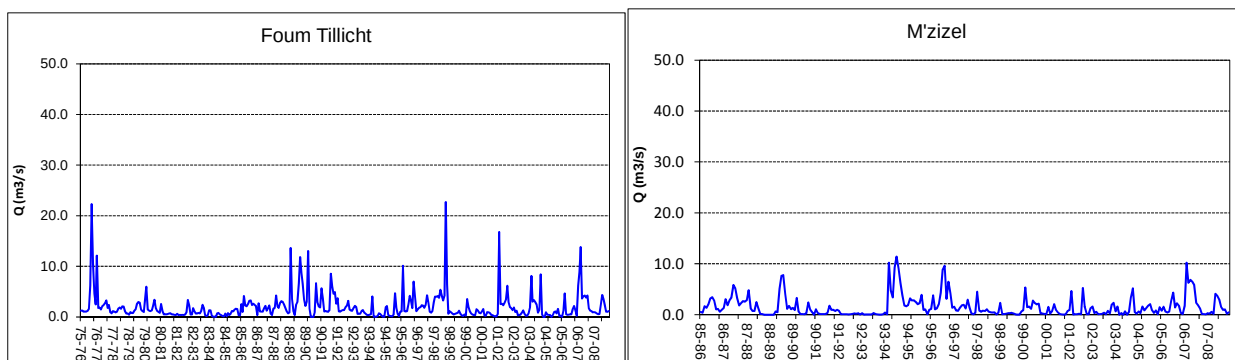


Figure 31 : Débits moyens mensuels interannuels des stations amonts (ABHGZR, 2011)

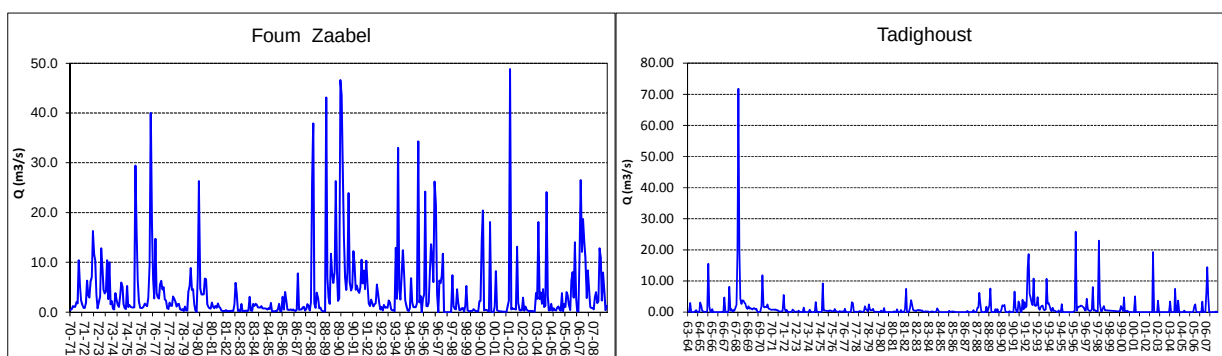


Figure 32 : Débits moyens mensuels interannuels des stations avals (ABHGZR, 2011)

3.3.3.3 Analyse fréquentielle des débits moyens mensuels

Etant donné l'écoulement non continu des oueds de la zone d'étude, une analyse fréquentielle de leurs débits moyens mensuels s'avère utile. La série des données traitées correspond à la période d'observation 1961–2008. Les résultats permettent de confirmer les observations faites précédemment (Figure 33).

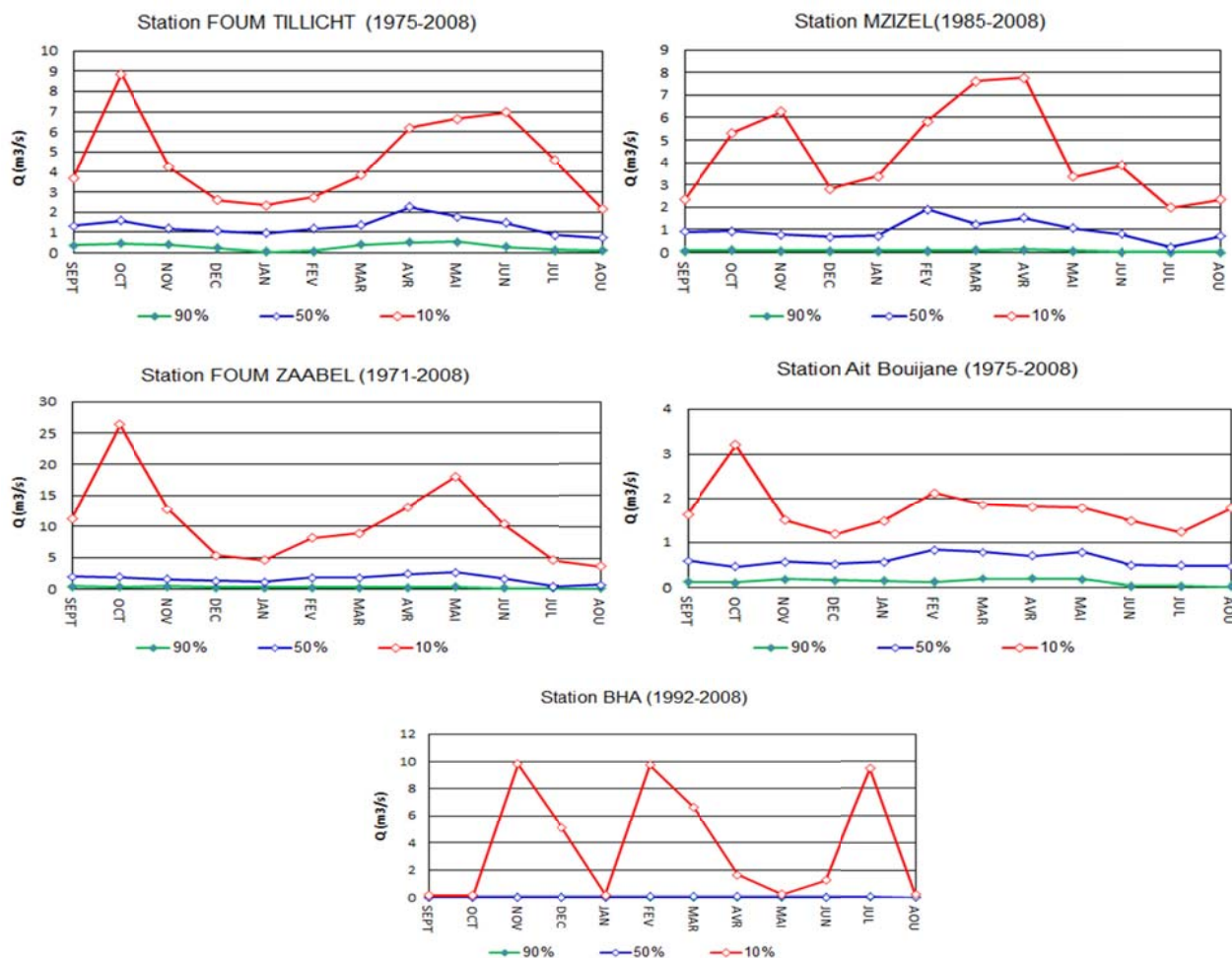


Figure 33 : Débits moyens mensuels des principaux cours d'eau de la zone d'étude d'après leur fréquence de dépassement (ABHGZR, 2011)

Les débits moyens mensuels dépassés à 90% sont faibles à nuls pour toutes les stations et tous les mois, à l'exception des débits de l'oued Ziz et son affluent oued Sidi Hamza à écoulement pérenne. Les débits médians sont également faibles.

L'intervalle de dispersion des débits est important en période des précipitations : le débit varie de 1 à 3 m³/s à Ait Bouijane, de 1 à 4 m³/s à Barrage Hassan Addakhil, de 1 à 5 m³/s à Foum Tillicht, de 1 à 5 à M'Zizel et de 1 à 11 m³/s à Tadighoust.

L'analyse des fréquences des débits mensuels permet de constater que, outre l'amplitude des variations saisonnières et interannuelles, les débits mensuels relatifs aux faibles fréquences de dépassement (années humides) présentent des pics en certains mois. Ils correspondent aux périodes des crues et aux périodes des fontes de neiges (2 à 3 pics par an).

3.3.3.4 Débits interannuels

A l'échelle interannuelle, les apports sont aussi variables. Les sécheresses sont récurrentes et peuvent être aiguës et longues comme le cas des années 1980-88, 1990-1993, 2000-03, etc. Néanmoins, on

peut remarquer une année avec un régime assez important au milieu d'une période qualifiée globalement sèche (Annexe 1).

3.3.4 Régime des sources

Dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris, 22 sources ont été recensées (campagne de l'ABHGZR, Mai-Juillet 2008). Ces sources semblent toutes drainer les aquifères Jurassiques. Les sources à plus forts débits drainent l'aquifère du Lias inférieur-Domérien (sources des gorges et de Zaouit Sidi Hamza). La situation géographique de ces sources est présentée sur la Figure 34.

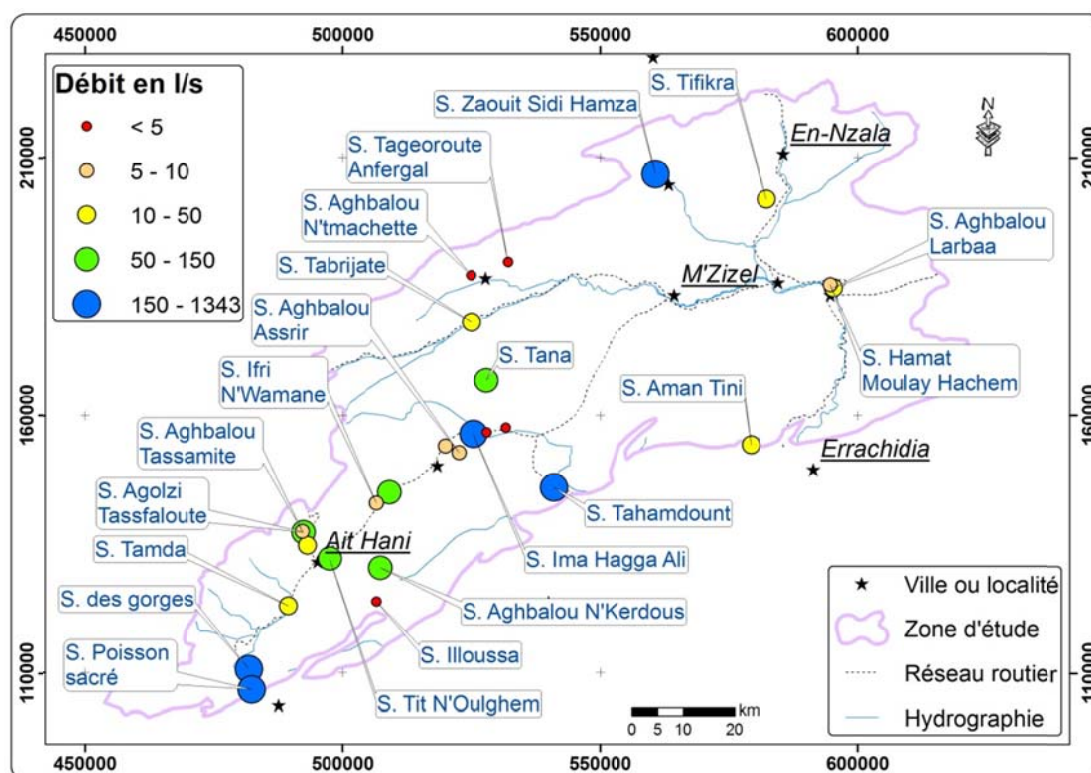


Figure 34 : Situation des sources inventoriées dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris

La campagne de jaugeage de mai-juillet 2008, a permis de jauger 72 sources, dont 26 sources appartenant à la zone d'étude. Le débit total mesuré pour l'ensemble des sources jaugeées était de 4748.4 l/s et 3382 l/s pour les sources appartenant à la zone d'étude. L'analyse spatiale de ces données montre que les débits sont variables d'une source à l'autre, le maximum est enregistré dans le haut Rhéris avec 1343l/s (sources des gorges), celui enregistré dans le haut Ziz est 515l/s (Zaouit Sidi Hamza). Généralement les sources de Rhéris fournissent un débit globale de 2734l/s et celles de Ziz fournissent un débit de 655l/s, soit respectivement 19% et 81% de l'ensemble de la zone d'étude.

Quant à la conductivité électrique des eaux, elle présente des valeurs très acceptables vis-à-vis des normes en vigueur. Les résultats de cette campagne sont récapitulés sur le Tableau 9.

Parmi les sources inventoriées de la zone, douze (12) sources sont mesurées régulièrement et disposent d'historiques assez complets. Les autres sources inventoriées disposent uniquement de quelques mesures du débit, effectuées lors des inventaires hydrogéologiques. Au départ, la fréquence des mesures des débits était mensuelle. A partir des années 2000, cette fréquence est revue à la baisse. Les caractéristiques des débits instantanés des sources jaugées sont présentées sur le Tableau 9.

Tableau 9. Hauts bassins de Ziz et Rhéris – Caractéristiques des débits instantanés des sources jaugées (l/s)

Bassin	Source	Nombre mesures	Moyenne	Max	Min	Ecart type	Coefficient de variation
Ziz	Zaouiat Sidi Hamza	220	1199	5952	135	930	0.78
	Moulay Hachem	171	18	41	3	7	0.37
	Aghbalou Larba	172	5	16	1	4	0.67
	Tahamdount	172	179	685	1	129	0.72
	Aghbalou N'kerdouss	110	127	400	42	71	0.56
	Ima Hagga Ali	17	87	178	30	40	0.46
Rhéris	Tahamdount	172	179	685	1	129	0.72
	Poissons sacrés	290	138	253	16	36	0.26
	Les gorges	297	788	3380	98	505	0.64
	Aghbalou N'kerdouss	110	127	400	42	71	0.56
	Ima Hagga Ali	17	87	178	30	40	0.46

L'évolution des débits de quelques sources est présentée dans les graphiques de la Figure 35. Ces sources montrent de variations saisonnières et interannuelles. Les amplitudes de ces variations diffèrent d'une source à l'autre. Les précipitations, la sécheresse et la mise en exploitation ont une influence directe sur le régime de ces sources.

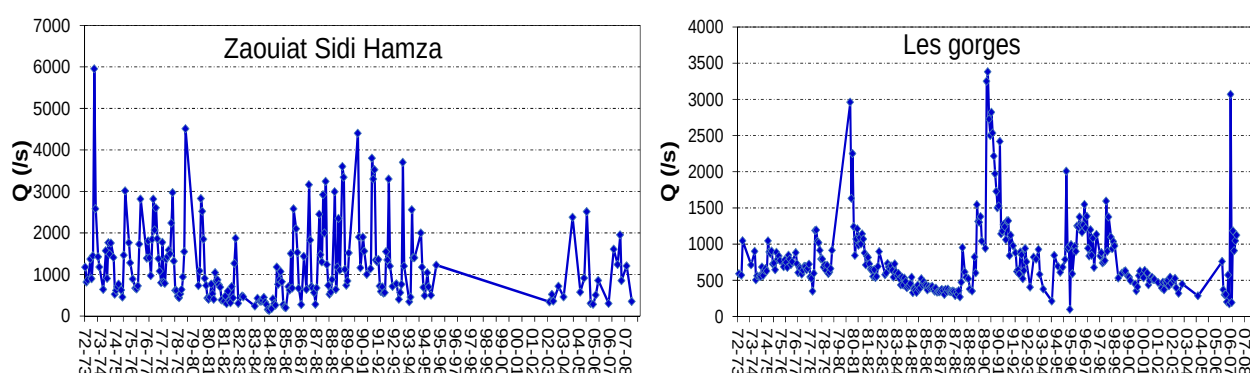


Figure 35 : Evolution interannuelle des débits des sources de Zaouiat Sidi Hamza et des gorges

3.4 Evaluation des apports en eaux de surface

3.4.1 Méthodologie

L'approche suivie consiste à calculer les apports naturels des bassins jaugés et la transposition des résultats aux bassins non jaugés avoisinants en calculant les coefficients de ruissellement et les débits spécifiques correspondants. Il s'agit de quantifier toutes les composantes (retours, prélèvement au fil

de l'eau, etc.) des apports influencés (mesurés) des sous-bassins versants jaugés pour reconstituer, par la suite les séries de débits naturels. Cette démarche est composée de quatre étapes:

- + Détermination des composantes influençant les apports des bassins versants jaugés et évaluation de leurs apports naturels ;
- + Calcul des débits spécifiques et les coefficients de ruissellement des bassins versants jaugés ;
- + Transposition des résultats aux bassins non jaugés ;
- + Quantification du potentiel global en eaux de surface des bassins de haut Ziz et Rhéris.

3.4.1.1 Détermination des composantes influençant les apports des bassins versants jaugés et évaluation de leurs apports naturels

Les sous bassins du haut Ziz et Rhéris comportent un potentiel important en eaux de surface qui intervient essentiellement dans le développement de la petite et moyenne hydraulique (PMH) de la zone, dont les seuils de dérivation, construits sur les cours d'eau pérennes, sont la base d'irrigation de ces périmètres.

Le débit naturel des sous bassins versants est fonction des composantes influençant les apports des cours d'eau traversant la zone. Ces composantes sont : a) les apports supplémentaires des sources d'eau qui rejoignent les cours d'eau et b) les prélèvements au fil d'eau destinés à l'irrigation.

Les apports naturels des bassins versants jaugés sont calculés en déterminant :

- Les volumes d'eau prélevés à l'amont de chaque station hydrologique puis les ajouter aux volumes enregistrés dans ces stations ;
- Les volumes d'eau des sources qui se trouvent à l'amont de chaque station puis les soustraits aux volumes enregistrés dans ces stations.

$$\text{Débit naturel} = \text{Débit influencé} + \text{Prélèvements d'irrigation} - (\text{Retour d'eau d'irrigation} + \text{Débits des sources d'eau})$$

Le débit influencé est le débit mesuré dans chaque station de jaugeage

1) Evaluation des prélèvements d'eau d'irrigation

a. Enquêtes de terrain

L'évaluation des volumes d'eau prélevés pour l'irrigation est faite sur la base des données recueillies pendant l'inventaire exhaustif des prélèvements d'eau destinées à l'irrigation et à l'AEP au niveau des bassins versants de Ziz et Rhéris (ABHGZR, 2012). Dans le cadre de cette thèse, seulement les prélèvements aux fils d'eaux sont exploités. Le résultat de ces enquêtes est présenté ci-après et serve par la suite à l'évaluation des prélèvements d'eau de surface pour chaque sous-bassins versant.

Le haut bassin de Ziz : Il comporte la majorité des périmètres de la petite et moyenne hydraulique (PMH) de la zone d'étude, qui sont éparpillés le long d'oued Ziz. Ces périmètres sont irrigués par dérivation des eaux pérennes, au moyen des prises traditionnelles (seuils de dérivation) alimentant un réseau de séguías en terre ou en ciment. Selon le résultat de l'enquête, la taille des parcelles est variable, allant de quelques mètres à plus de 100 ha avec une superficie globale de 4276 ha. Ces 4276 ha sont irrigués principalement par les eaux de surface. Les eaux souterraines ne participent que d'une manière exceptionnelle, c'est la raison pour laquelle elles ont été écartées de cette analyse.

D'après la même enquête, les principales occupations des sols sont les blés, luzernes, maïs, fèves, palmiers, oliviers, arboricultures, abricotier et les pommiers. La Figure 36 résume le pourcentage des assolements pratiqués au niveau de chaque sous bassin versant du haut Ziz.

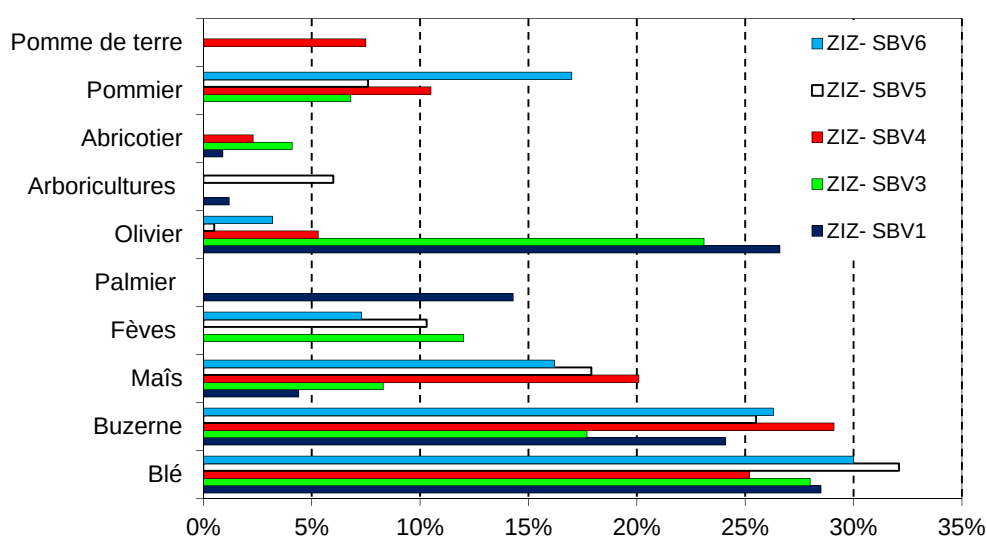


Figure 36 : Assolements pratiqués dans les sous bassins du haut Ziz (ORMVAT, 2015)

Les superficies détaillées des PMH des sous bassins du haut Ziz ainsi que les origines d'eau d'irrigation sont présentées en Annexe 2.

Le haut bassin de Rhéris : Il comporte une petite portion de la moyenne hydraulique (PMH) qui est localisée essentiellement de part et d'autre d'oued Rhéris entre la localité de Lahroune et Ait M'hamed O Youssef. En moyenne, la taille des parcelles est inférieure à celles du haut Ziz avec une superficie globale de 908 ha, partagée entre le sous bassin RH-SBV1 (49.56%), le sous bassin RH-SBV3 (23.35%) et le sous bassin RH-SBV4 (27.09%).

Les principales occupations des sols sont les blés, luzernes, maïs, fèves, palmiers, oliviers, arboricultures, abricotiers et les pommiers. Les superficies détaillées des PMH des sous bassins du haut Rhéris ainsi que les sources d'eau d'irrigation sont présentées en Annexe 3.

b. Evaluation des prélèvements d'eau d'irrigation

Le prélèvement d'eau de surface peut être estimé par des méthodes directes qui consistent en la détermination des débits prélevés comme étant le produit des débits instantanés mesurés et la durée annuelle de prélèvement, ou indirecte, par exemple en s'appuyant sur la détermination des cultures pratiquées au niveau des exploitations desservies et ses besoins en eaux.

En tenant compte de la masse et du type d'information disponibles, la méthode d'évaluation des prélèvements d'eau de surface retenue est basée sur la connaissance des demandes en eau nettes des cultures et la connaissance des superficies irriguées de chaque culture.

Le volume prélevé pour l'irrigation de chaque culture est calculé selon la formule suivante :

$$V_c (m^3) = \sum Sic \times Dc$$

Sic : Superficie irriguée de chaque culture en ha.

Dc : Demandes nettes moyennes annuelles en eau de chaque culture en m³/ha.

Le volume prélevé au sein d'une exploitation est la somme des volumes prélevés (Vc).

La demande nette en m³/an diffère d'une culture à une autre, le Tableau 10 résume les besoins des cultures pratiquées dans la zone (ORMVAT, 2015):

Tableau 10. Besoins en eau par culture (ORMVAT, 2015)

Cultures	Besoin en eaux m³/an
Blé	2400
Luzerne	11800
mais	5300
Fèves	1800
palmier	10500
olivier	8600
Arboricultures	8600
Abricotier	8600
Pommier	8600
Pomme de terre	3500
Moyenne	7356

Après la connaissance des besoins en eaux de chaque culture, il s'avère nécessaire d'intégrer les différents périmètres situés à l'amont de chaque station hydrologique et le calcul par la suite des volumes d'eau annuels prélevés dans chaque sous bassin versant.

Quant aux retours d'eaux d'irrigation, ils sont généralement les quantités d'eau qui rejoignent le réseau de drainage (cours d'eau). Le pourcentage des retours d'eau utilisé dans cette étude est estimé à 25% des prélèvements (ABHGZR, 2011). Cette quantité sera soustraite des prélèvements pour obtenir l'apport naturels de chaque sous bassin versant.

Les tableaux de l'annexe 4 présentent le détail des calculs des prélèvements nets à l'amont de chaque station hydrologique. La Figure 37 résume les prélèvements nets d'irrigation calculés à l'amont de chaque sous bassin versant de la zone d'étude.

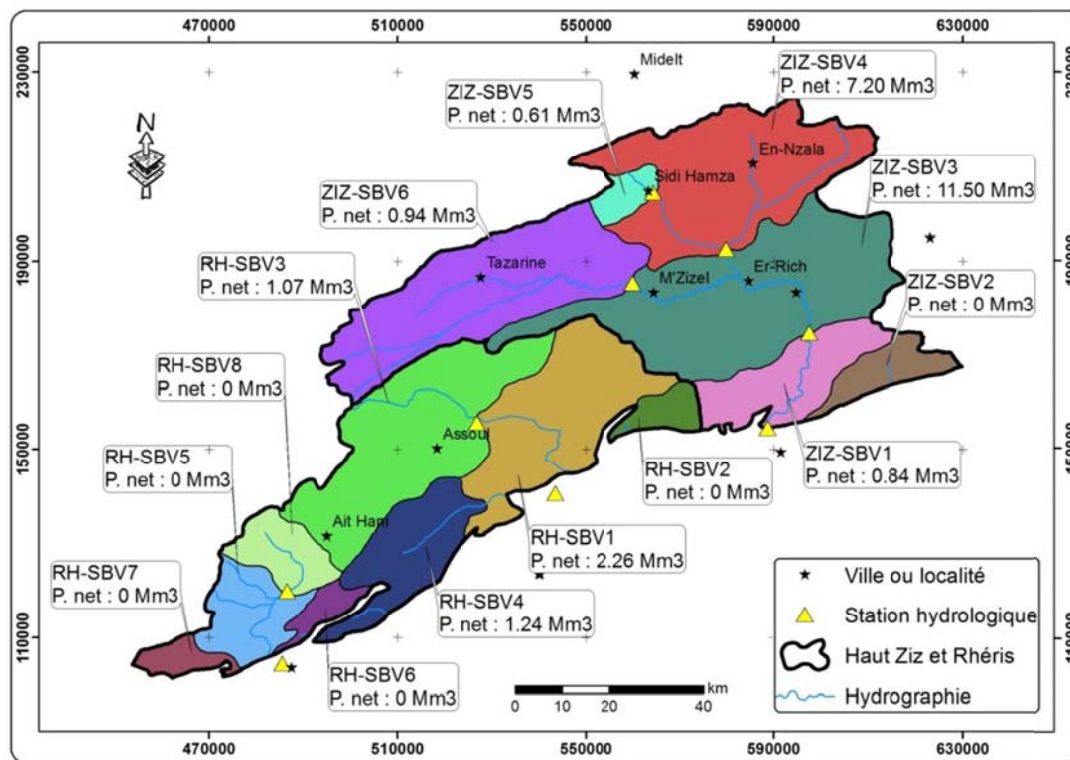


Figure 37 : Prélèvements nets d'irrigation dans les sous bassins des hauts Ziz et Rhéris

Les prélèvements nets d'irrigation dans les sous bassins versants des hauts Ziz et Rhéris sont importants, ils sont estimés à 25.21 Mm³. La grande partie de ces prélèvements s'effectue dans les périmètres des sous bassins ZIZ-SBV3 et ZIZ-SBV4, avec respectivement un pourcentage de 44% et 29%. Suivie du sous bassin de RH-SBV1 avec un pourcentage de 9%. Dans le reste de la zone d'étude, les prélèvements sont inférieurs à 4%.

2) Evaluation des apports des sources d'eau

Dans la zone d'étude, douze (12) sources sont mesurées régulièrement et disposent donc d'historiques assez complets. Au départ, la fréquence des mesures était mensuelle, à partir de l'année 2000, cette fréquence est revue à la baisse. Les autres sources inventoriées disposent seulement quelques mesures des débits, effectuées pendant des inventaires discontinus (ABHGZR, 2011).

La Figure 38 présente les apports annuels des sources inventoriées en amont de chaque sous bassin versant des hauts Ziz et Rhéris.

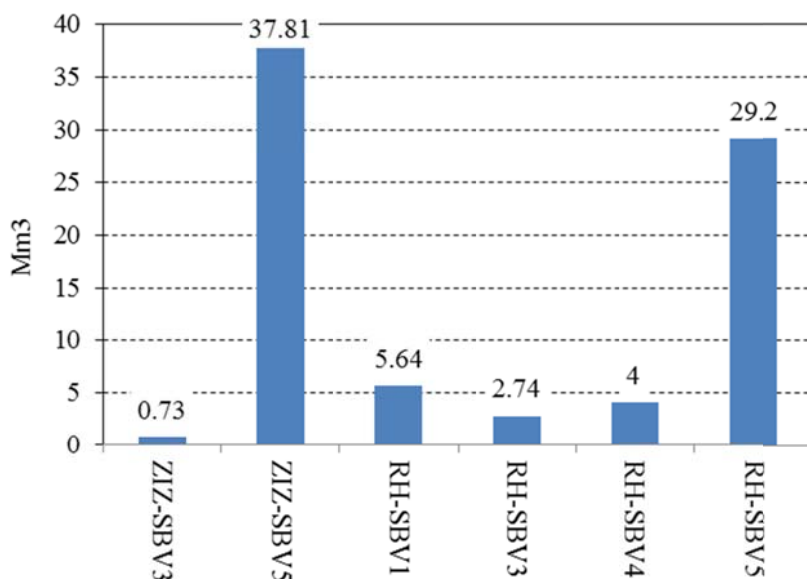


Figure 38 : Apports des sources des sous bassins des hauts Ziz et Rhéris

Il ressort de ces histogrammes que les sous bassins ZIZ-SBV5 et RH-SBV5 (Figure 37) présentent les sources les plus importantes de la zone avec des apports en eau respectivement de 37.81 Mm³ et de 29.2 Mm³.

La source de Zaouit Sidi Hamza qui se trouve au niveau du sous bassin ZIZ-SBV5 est l'une des plus grosses sources de la région. Elle sort du Lias inférieur dans les gorges en amont de Zaouia Sidi Hamza, à près de 21 Km à partir de la route principale Errachidia-Meknès. Cette résurgence a un débit très important et à peu près stable toute l'année.

Les sources du Poisson sacré et des gorges qui se trouvent au niveau du sous bassin RH-SBV5 sont des sources du Lias inférieur et elles ont fréquemment de gros débits, parfois vaclusiennes. Elles assurent la pérennité d'oued Rhéris et l'irrigation de la palmeraie de Tinghir en aval de 3400 ha.

Les autres sources qui se trouvent en amont des autres sous bassins versants ont globalement des débits discontinus en fonction des précipitations et des sécheresses.

Au total, les sources des hauts Ziz et Rhéris fournissent un apport supplémentaire d'environ 80Mm³ aux stations de jaugeages correspondantes.

3) Evaluation des apports naturels des bassins jaugés

Après avoir calculé les prélèvements nets d'irrigation et les apports des sources des sous bassins versants jaugés, il est nécessaire de calculer les débits spécifiques et les coefficients de ruissellement naturels des stations jaugées pour évaluer, par la suite, par transposition, les apports des stations non jaugées. Le débit naturel des bassins peut s'écrire de la manière suivante :

$$\text{Débit naturel} = \text{Débit influencé} + \text{Prélèvements nets d'irrigation} - \text{débits des sources}$$

Le Tableau 11 présente les débits naturels calculés des stations jaugées (Figure 37) des hauts Ziz et Rhéris:

Tableau 11. Apports naturels des sous bassins versants jaugés des haut Ziz et Rhéris

Sous bassin versant	Station hydrologique	Superficie station (km ²)	Débit station (m ³ /s)	Apport station influencé (Mm ³)	Prélèvement Net irrigation (Mm ³)	Apports sources (Mm ³)	Apports naturels des bassins (Mm ³)
ZIZ-SBV1	B.H. Addakhil	473	1.38	43.52	0.84	-	44.36
ZIZ-SBV2	-	212	N/A	N/A	0	-	-
ZIZ-SBV3	Foum Zaabel	1528	4.18	131.82	11.05	0.725	142.15
ZIZ-SBV4	Foum Tillilcht	1190	2.02	63.70	7.20	-	70.9
ZIZ-SBV5	Zaouiat Sidi Hamza	113	N/A	N/A	0.61	37.81	-
ZIZ-SBV6	Amouguer M'Zizel	1208	1.59	50.14	0.94	-	51.08
RH-SBV1	Tadighoust	909	1.24	39.10	2.26	5.64	35.72
RH-SBV2	-	130	N/A	N/A	0	-	-
RH-SBV3	Amouguer Taghia	1158	N/A	N/A	1.07	2.74	-
RH-SBV4	-	488	N/A	N/A	1.24	4.005	-
RH-SBV5	Ait Bouijane	340	0.92	29.01	0	29.20	0.19
RH-SBV6	-	102	N/A	N/A	0	-	-
RH-SBV7	-	112	N/A	N/A	0	-	-
RH-SBV8	Tamtetoucht	253	N/A	N/A	0	-	-
TOTAL		564 847					

D'après ces résultats, on peut considérer en moyenne que 42% des apports influencés des sous bassins versants sont constitués de prélèvements d'eau d'irrigation et des apports des sources d'eau qui rejoignent les cours d'eau, ce qui représente environ un apport de 58 Mm³/an pour l'ensemble de la zone d'étude. Le ruissellement sur ces bassins (564 847km²) qui est souvent sous forme de crues brèves et violente représente 58%.

3.4.1.2 Calcul des débits spécifiques et les coefficients de ruissellement des bassins versants jaugés

1) Débits spécifiques

Le débit spécifique intervient dans la quantification des apports en eau des bassins versants. Son calcul est le résultat du rapport entre le débit naturel et la superficie de la station hydrologique correspondant.

$$\text{Débit spécifique (l/s/km}^2\text{)} = \text{Débit naturel (l/s)} / \text{Superficie station (km}^2\text{)}$$

Le Tableau 12 montre les débits spécifiques obtenus pour chaque sous bassin versant.

Tableau 12. Débits spécifiques calculés des sous bassins jaugés des hauts Ziz et Rhéris

Sous bassin versant	Station hydrologique	Superficie station (km ²)	Débit station influencé (m ³ /s)	Débit naturel (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
Ziz-SBV1	B.H. Addakhil	473	1.38	1.41	2.97
Ziz-SBV3	Foum Zaabel	1528	4.18	4.51	2.95
Ziz-SBV4	Foum Tillilcht	1190	2.02	2.25	1.89
Ziz-SBV6	Amouguer M'Zizel	1208	1.59	1.62	1.34
RH-SBV1	Tadighoust	909	1.24	1.13	1.25
RH-SBV5	Ait Bouijane	340	0.92	0.01	0.02

Il ressort de ces résultats l'existence des contrastes entre les différents sous-bassins de la zone. On y note que pour les sous-bassins Ziz-SBV4, Ziz-SBV6, RH-SBV1 et RH-SBV5, le débit spécifique varie en moyenne entre 0.02 L/s/km² et 1.89 L/s/km² alors qu'il est plus élevé (entre 2.95 L/s/km² et 2.97 L/s/km²) pour le reste de la zone. Les contrastes alors observés peuvent témoigner de comportements hydrologiques distincts, en rapport plus avec des facteurs climatiques (e.g. précipitations) et/ou certaines caractéristiques des bassins versants.

Comparativement aux débits spécifiques obtenus dans les sous-bassins des hauts Ziz et Rhéris, ceux du haut Ziz présentent des valeurs supérieures. En effet, des débits spécifiques de l'ordre de 2.95 L/s/km² et de 2.97 L/s/km² sont observés respectivement dans les sous-bassins de Ziz-SBV1 et de Ziz-SBV3.

2) Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement (Cr) est le rapport de la lame d'eau ruisselée et la lame d'eau précipitée. Il permet de quantifier le rendement du bassin lors d'un événement pluvieux.

$$\text{Cr} = \text{Lame d'eau ruisselée (mm)} / \text{Lame d'eau précipitée (mm)}$$

Les coefficients de ruissellement calculés des sous bassins jaugés sont indiqués sur le Tableau 13.

Tableau 13. Coefficient de ruissellement des stations hydrologiques des hauts Ziz et Rhéris

Sous bassin versant	Station hydrologique	Superficie station (km ²)	Précipitation (mm)	Débit naturel (m ³ /s)	Lame d'eau ruisselée (mm)	Coefficient de ruissèlement
Ziz-SBV1	B.H. Addakhil	473	124	1.41	93.78	75.63%
Ziz-SBV3	Foum Zaabel	1528	184	4.53	93.50	50.56%
Ziz-SBV4	Foum Tillilcht	1190	200	2.25	59.58	29.79%
Ziz-SBV6	Amouguer M'Zizel	1208	183	1.62	42.28	23.11%
RH-SBV1	Tadighoust	909	147	1.31	45.50	26.73%
RH-SBV5	Ait Bouijane	340	144	0.01	0.93	0.64%

On peut considérer en moyenne que 34% des apports des sous bassins sollicités arrivent jusqu'aux leurs exutoires finaux, ce qui représente un apport ruisselé de 121 Mm³/an environ. Par ailleurs, le

ruissellement sur les différents sous-bassins versants n'est homogène ; les résultats obtenus ont clairement démontrés que pour le haut Ziz, le coefficient de ruissellement augmentait relativement avec le volume de pluie et qu'il n'est pas constant pour une surface donnée. Au contraire pour les sous bassins du Haut Rhéris, le coefficient de ruissellement est proportionnel de la superficie du bassin correspondant.

3.4.1.3 Transposition des résultats aux bassins non jaugés et évaluation de l'apport global

Le calcul des apports en eaux de surface de la zone est basé sur les valeurs des débits spécifiques et les coefficients de ruissellement calculés au niveau des bassins jaugés qui seront transposés aux bassins non jaugés.

Les débits spécifiques seront transposés entre les bassins ayant des contextes climatique, hydrogéologique et topographique similaires (pluie, superficie, relief, existence des nappes, etc.). Dans le cas contraire, les coefficients de ruissellement qui seront transposés. En effet, un débit de $10.63 \text{ m}^3/\text{s}$ est calculé pour les différents sous bassins du Haut Ziz et un débit de $3.94 \text{ m}^3/\text{s}$ est calculé pour les différents sous bassins du Haut Rhéris, ce qui donne un apport global d'eau de ruissellement de 459.5 Mm^3 .

3.5 Conclusion

Les hauts Ziz et Rhéris sont marqués par un climat continental de type aride à semi-aride, caractérisé par une faible pluviosité de l'ordre de 169 mm en moyenne, une forte évaporation et des températures moyennes élevées pouvant atteindre les 31.35°C avec des écarts mensuel et journalier assez importants.

Le régime hydrologique des bassins versants de la zone se caractérisent par une extrême irrégularité saisonnière et interannuelle qui est directement liée aux apports pluviométriques. Par conséquent, l'hydrologie de la zone se trouve fortement influencée par ce climat, qui agit directement sur le bilan et par la même occasion sur l'alimentation et les pertes.

L'évaluation des apports en eaux de surface montre un apport moyen global de l'ordre de 459.5 Mm^3 , dont 73% se ruisselle seulement dans le haut Ziz tout seul.

Chapitre 4. Caractérisation hydrogéologique des systèmes aquifères profonds

4.1 Extension et géométrie des réservoirs aquifères profonds

4.1.1 Méthodologie et principe

Pour évaluer le fonctionnement hydraulique des faciès aquifères identifiés, il importe de les caractériser. Un des paramètres relatifs à cette caractérisation est la géométrie des formations géologiques constituant chaque réservoir aquifère. La géométrie déterminera outre l'enveloppe latérale des réservoirs aquifères, les épaisseurs des différentes formations intervenant dans la détermination des échanges hydrauliques, ainsi que les zones d'affleurement qui constituent le lieu de la recharge (G. Castany, 1998).

Le modèle géométrique proposé prend en compte les différentes interfaces sédimentaires du Lias inférieur-Domérien, de l'Aalénien-Bajocien et du Bajocien-Bathonien. Elle repose sur l'interprétation des coupes lithologiques des forages disponibles, au nombre de 365, ainsi que sur les affleurements observés sur les cartes géologiques disponibles. Elle intègre également les principaux traits structuraux du secteur (failles) ; Les failles retenues correspondent à celles visibles sur les cartes géologiques, sur les profils géo-électriques et sur la carte des linéaments (Figure 21).

En fonction de la grande puissance des séries jurassiques, peu de forage ont atteint la base du Lias ou du Dogger, mêmes ceux implantés dans leurs aires d'affleurement. Pour pallier à ce manque d'information, la méthodologie de la Figure 39 a été retenue pour construire les isohypses du Lias inférieur-Domérien et les réservoirs sus-jacents de l'Aaléno-Bajocien et du Bajocien-Bathonien.

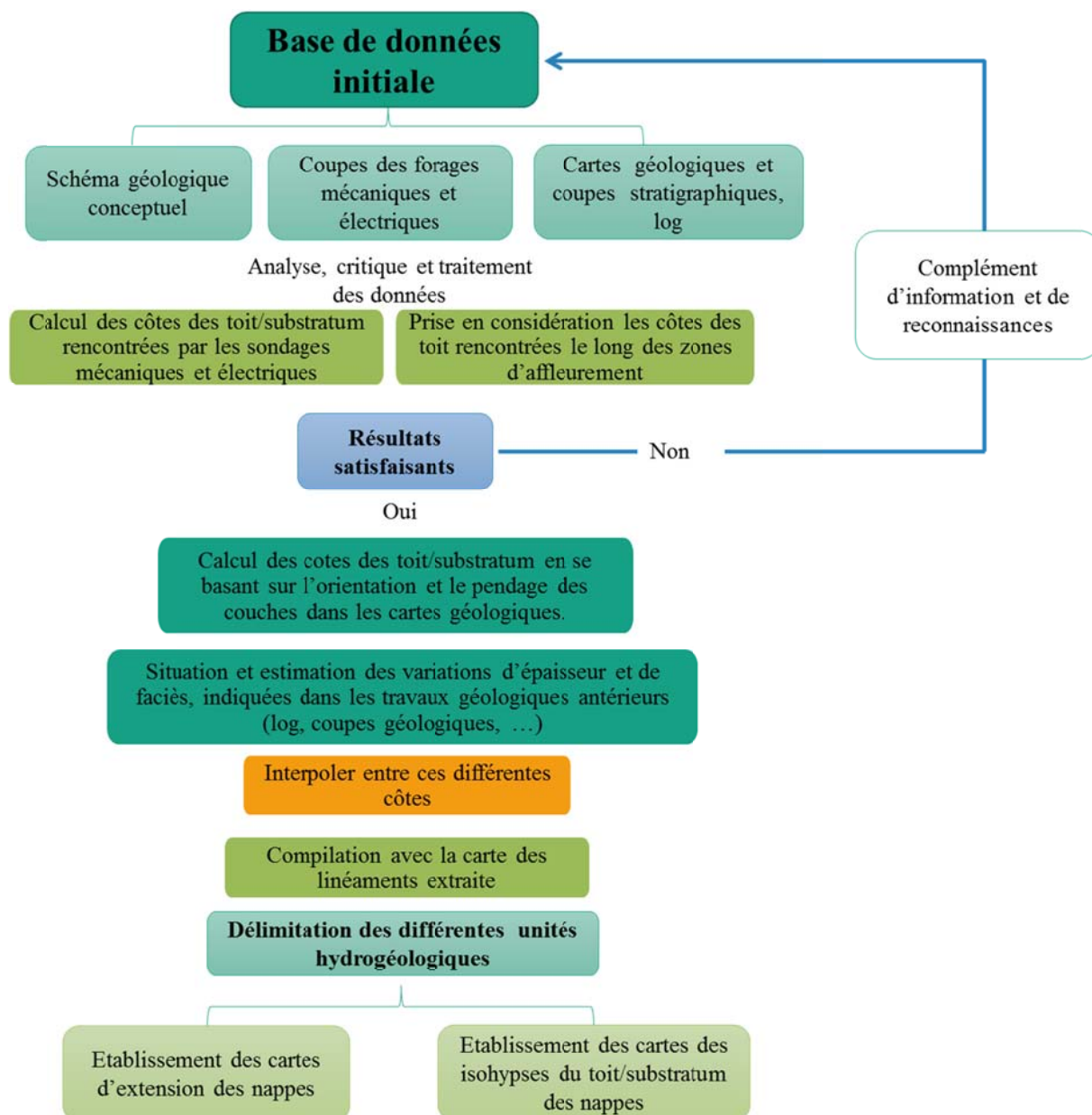


Figure 39 : Aires d'affleurement du complexe Lias inférieur - Domérien

En plus, d'aide à cartographier les isohypses des toits du Lias inférieur-Domérien, de l'Aaléno-Bajocien et du Bajocien-Bathonien, cette méthodologie serve aussi à l'établissement des isopaques de ces réservoirs aquifères.

Le schéma d'interpolation retenu représente donc un exemple d'interprétation possible, à partir des données disponibles. Ce schéma peut être mise à jour, notamment dans les zones pauvres de données suffisantes.

4.1.2 Système aquifère du Lias inférieur – Domérien

4.1.2.1 Géométrie et extension

Le Lias inférieur-Domérien constitue un réservoir relativement continu, il s'étend sur environ 7800 km² et il est rencontré en affleurement sur 2360 km² (Figure 40).

Cette structure est bien conservée tout le long des crêtes anticlinales, notamment dans la zone orientale entre Midelt et Errachidia et les secteurs sud entre Errachidia et Tinghir. Selon la synthèse géologique (Paragraphe 2.1), ce système repose sur un substratum Permo-triasique qui constitue un radier imperméable général et continu, parfois rencontré en affleurement dans certains axes anticlinaux (Figure 40).

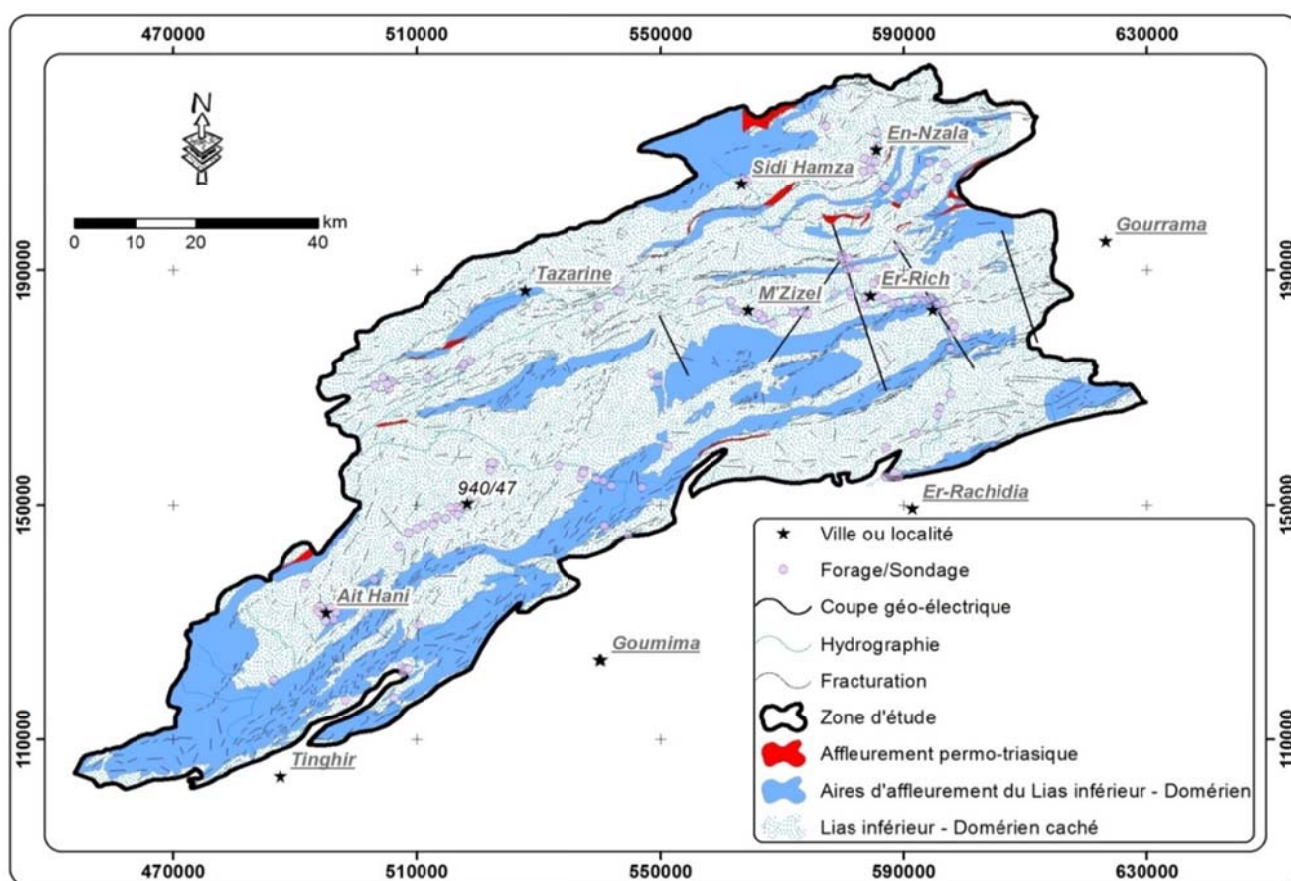


Figure 40 : Aires d'affleurement du complexe Lias inférieur - Domérien

La Figure 41 présente les isohypses du toit du Lias inférieur – Domérien obtenues par interpolation. Les cotes du toit varient de -130m m Ngm à plus de 3500 m Ngm. Les cotes les plus élevées sont caractéristiques des zones situées au Nord-ouest de la zone d'étude.

Généralement, le Lias inférieur-Domérien montre un approfondissement sous l'effet des failles en s'éloignant des axes anticlinaux et les zones d'affleurement. Le pendage des isohypses sont fort de part et d'autres de ces axes, il diminue au fur et à mesure en allant vers les centres des bassins

synclinaux (Bassins losangiques). Localement, entre les localités de M'Zizel et Tazarine, des dépressions en cuvettes ou des sillons profonds affectent la série liasique sont observés.

La combinaison de ces résultats avec la fracturation issue du traitement d'image montre bien que la direction d'inclinaison du toit liasique suit bien la direction de la fracturation. Il s'agit des bassins d'effondrement qui sont bordés par de longues crêtes demeurées en hauteur, qui montrent souvent pour leur part des surfaces structurales assez pentées. Ces crêtes inclinées de calcaires ou de dolomies, constituent les principaux axes de crêtes du Haut Atlas.

1) Epaisseur

En fonction des grandes puissances de la série du Lias-Domérien et l'insuffisance des données sur son mur, l'allure de ce dernier n'est pas traitée dans le cadre de ce travail.

2) Profondeur

La soustraction de l'MNT par les isohypses du toit du Lias inférieur-Domérien permet de définir la profondeur du toit de ce réservoir. En effet, le réservoir est libre sur ses aires d'affleurement et il se trouve à des profondeurs variables selon les secteurs. Son toit est rencontré au droit des sondages électriques exécutés (LPEE, 1994) à des profondeurs variables. En moyenne, il se trouve à 230m, il est rencontré à 761m/sol près du sondage RGII-SE8 (Figure 12) et à plus de 2000m/sol au nord de la localité de Tazarine, qui représente la profondeur maximale. Ailleurs sa profondeur varie entre 500 et 1500 m/sol (Figure 43).

Le tableau en annexe 5 résume les profondeurs et les côtes du toit du Lias inférieur – Domérien, rencontrées par sondages électriques (LPEE, 1994).

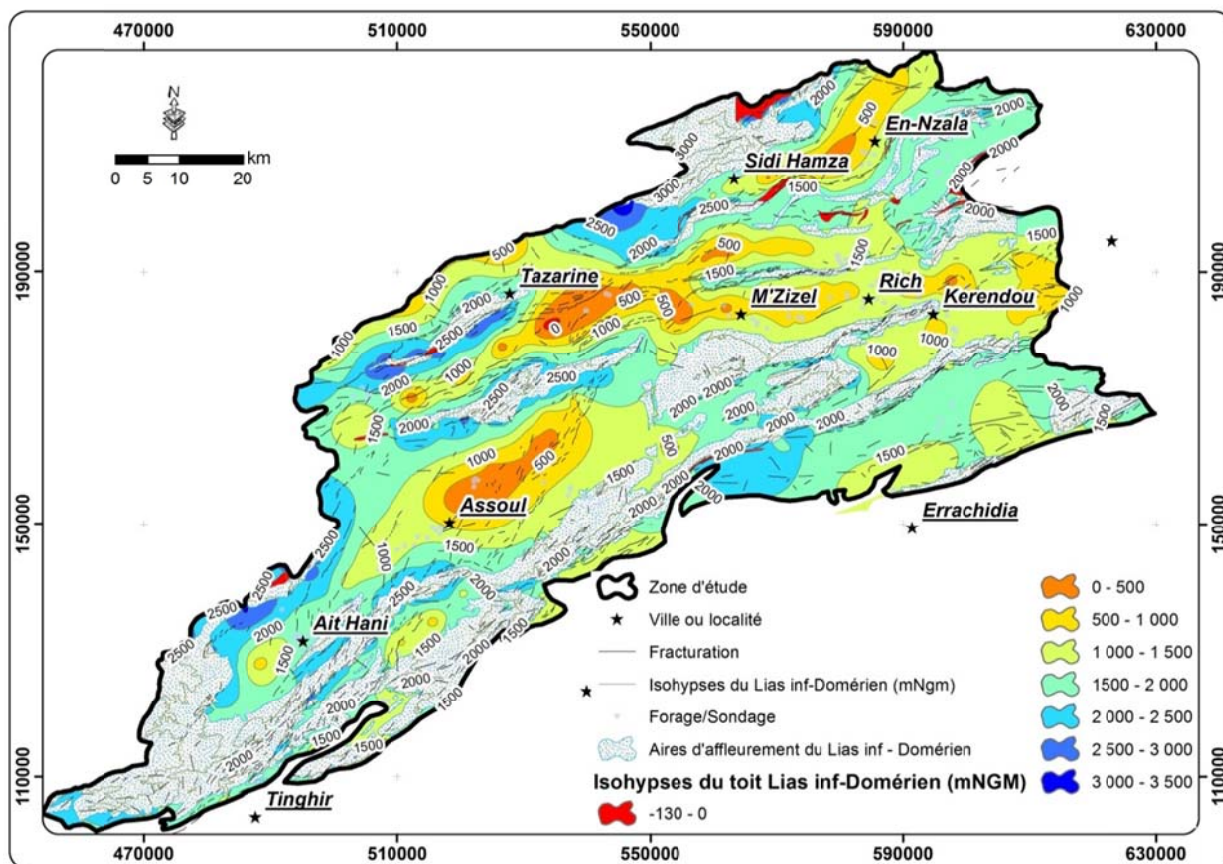


Figure 41 : Isohyets du toit du Lias inférieur – Domérien (mNgm)

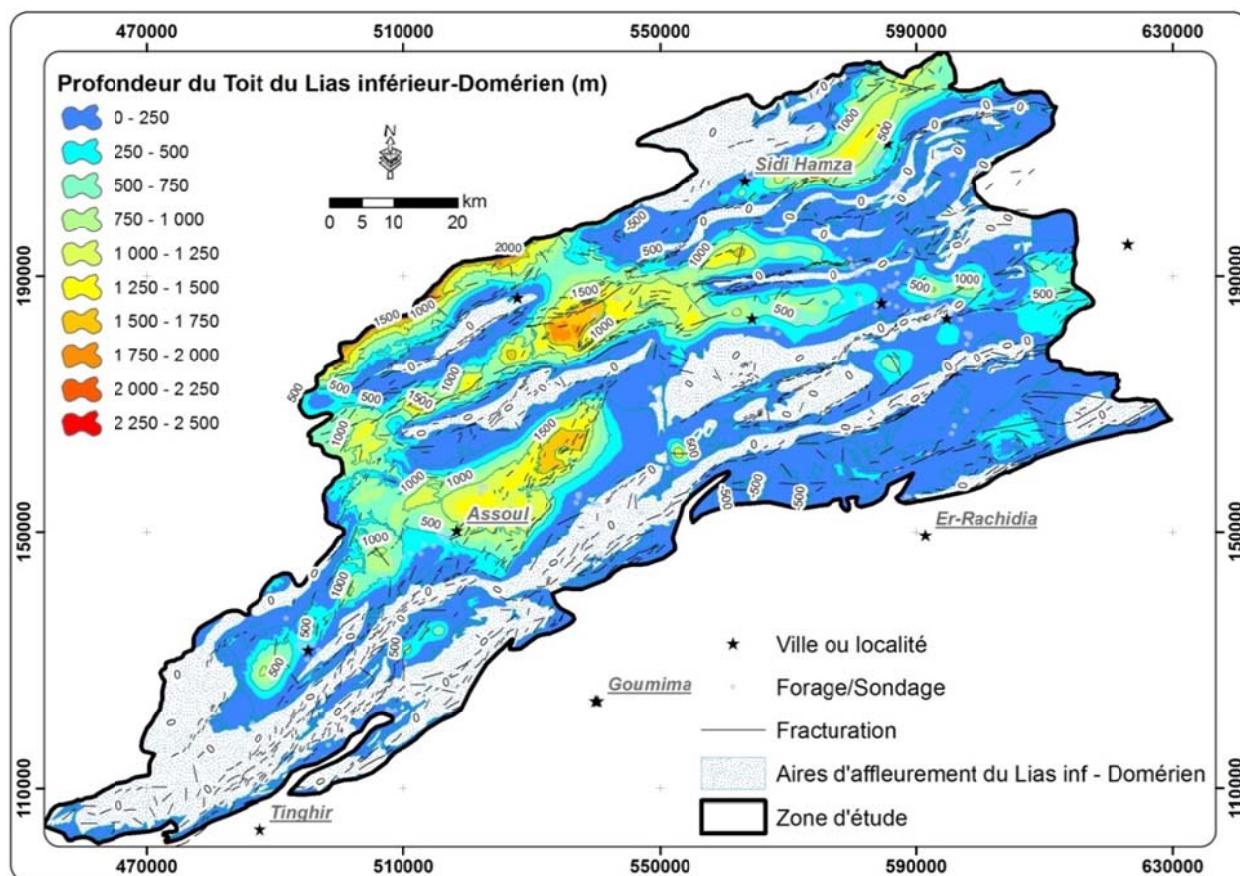


Figure 42 : Profondeur du toit du complexe Lias inférieur – Domérien (m/sol)

4.1.3 Systèmes aquifères de l'Aalénien-Bajocien

4.1.3.1 Découpage et caractérisation des unités hydrogéologiques

D'après l'analyse des faciès, le Dogger peut renfermer un niveau calcaire à corniches qui représente le membre 4 de la formation d'Agoudim, attribué à l'Aaléno-Bajocien. Par l'interprétation des sondages électriques et mécaniques et les cartes géologiques, l'Aalénien-Bajocien est généralement sous formes d'unités séparés (cuvettes synclinales), sans ou à faibles communications.

Au-dessous, l'Aalénien-Bajocien est séparé par le niveau imperméable et puissant du Toarcien-Aalénien inférieur, qui joue, de ce fait, un rôle hydrogéologique du premier plan du Haut Atlas calcaire. Les communications entre le complexe Aalénien-Bajocien et le réservoir sous-jacent (Lias inférieur – Domérien) ne sont possibles qu'à la faveur de failles.

Très schématiquement, le système Aaléno-Bajocien, est découpé en 6 unités structurales (Figure 43), qui correspondent chacune à des unités hydrogéologiques plus ou moins indépendantes qui seront étudiées ci-dessous.

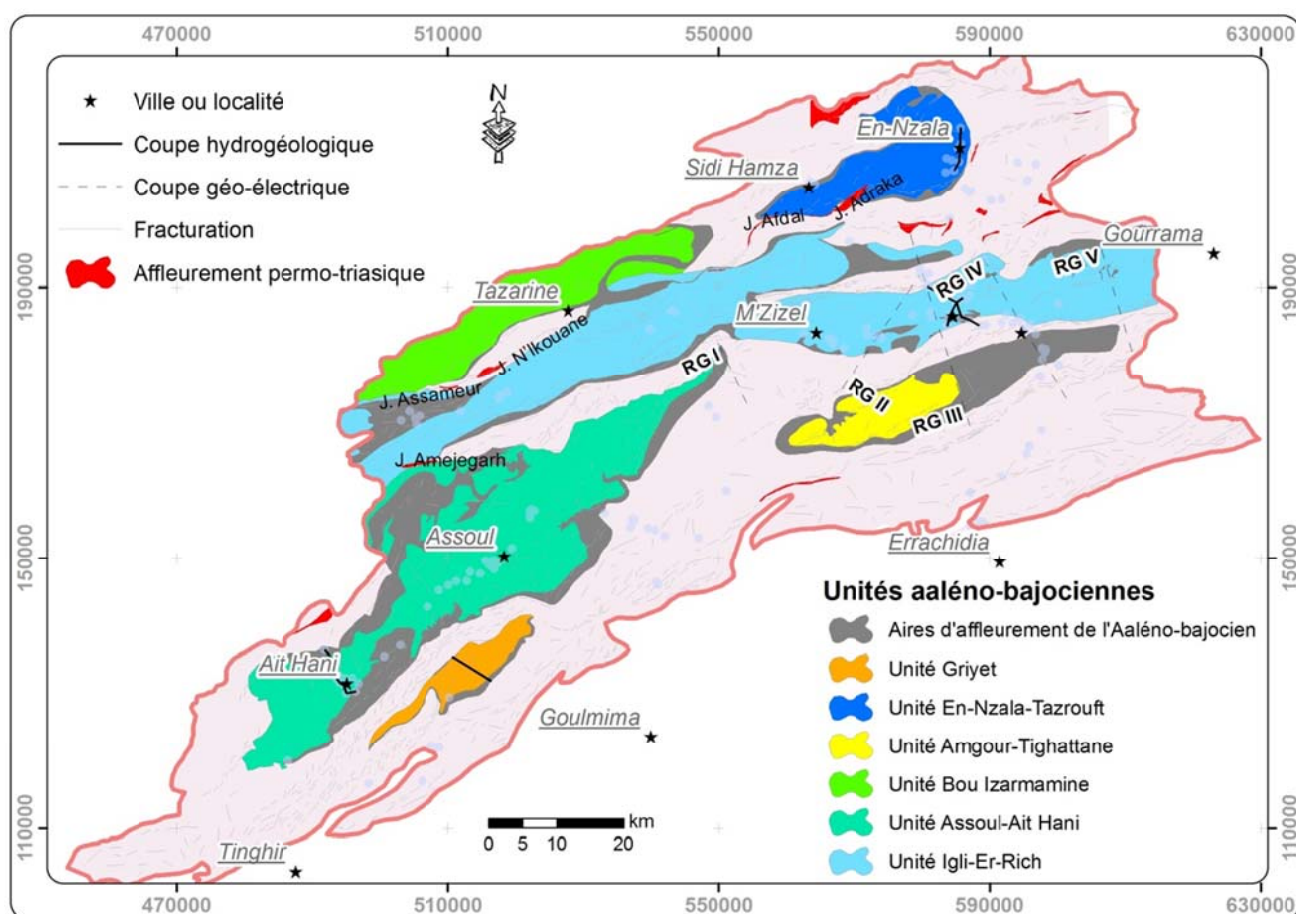


Figure 43 : Extensions des unités hydrogéologiques Aaléno-Bajociens

1) Unité de Griyet

Géométrie et extension : C'est la plus petite unité hydrogéologique identifiée dans la zone. Vu l'absence des sondages électriques et le nombre réduit des forages au niveau de cette unité ainsi que leur faibles profondeurs, sa géométrie est schématisée par une coupe géologique établie à partir de la carte géologique du Haut Atlas de Midelt au 1/200 000. Cette coupe transversale de direction NO-SE (Figure 44) a montrée que l'Aaléno-Bajocien s'enfonce progressivement sous des puissants niveaux crétacés. Une probable faille sub-v verticale à jeu inverse, bien identifiée sur la carte géologique, a mis en contact direct le Bajocien avec le Turonien et probablement avec les autres dépôts crétacés, ceci confirme que l'Aaléno-Bajocien est une unité indépendante des autres unités aaléno-bajociens avoisinantes.

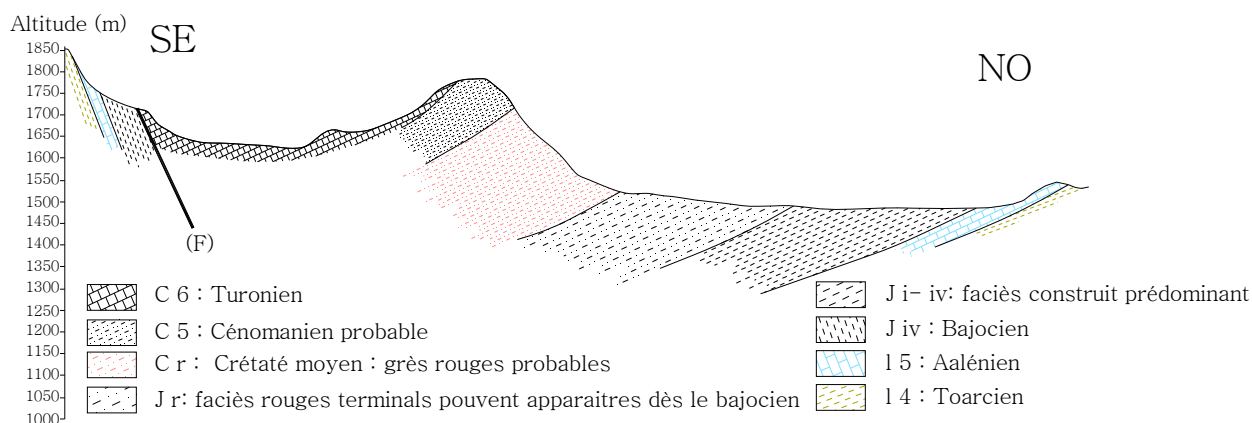


Figure 44 : Coupe géologique traversant l'unité de « Griyet » du complexe Aaléno-Bajocien

Sur la base de cette hypothèse, l'Aaléno-Bajocien s'étend sur environ de 108 km² et rencontré en affleurement seulement sur 19 km². La carte des isohypses du toit de l'Aaléno-bajocien résultante est représentée sur la Figure 50. Il ressort de cette carte que l'Aaléno-Bajocien est libre sur ses aires d'affleurements et son toit est assimilé à la topographie, au-delà, il devient captif sous les puissantes niveaux du Dogger et du Crétacé (soit environ 80% de la superficie de l'unité).

Il se trouve à des profondeurs variables selon les secteurs. Il est à quelques mètres dans les limites nord de cette unité. Au centre il peut être rencontré entre 500 et 700m/sol, si cette formation maintienne un pendage constant.

2) Unité d'En-Nzala - Tazrouft

Géométrie et extension : Cette unité est sous forme d'un synclinal étroite en Ouest et large de son côté Est, elle est faillée, mais bien conservé notamment dans ses limites nord, ouest et sud ; il est nettement identifiable sur les photos aériens et sur les cartes géologiques.

De point de vue structurale, cette unité hydrogéologique est parfaitement délimitée sur les côtés suivants:

+ Au sud, le long des Jebels Afdal et Adraka, le Trias occupe des bandes étroites, mises en place par des failles de mêmes directions qui sont considérées comme des décrochements tardi-hercyniens

(El Kochri, 1981). Ces failles sub-verticales deviennent parfois des chevauchements à vergence nord ou sud. Cette structure tectonique met en contact directe les formations triasiques imperméables avec les calcaires aaléno-bajociens. Les failles responsables de cette structure isolent hydrauliquement de manière presque parfaite et continue, l'unité En-Nzala - Tazrouft aux autres unités aaléno-bajociennes ;

+ Dans le reste de cette unité, au niveau de ses aires d'affleurement, l'Aaléno-Bajocien se trouve en contact normal avec les marnes du Toarcien-Aalénien inférieur sous-jacentes.

L'Aaléno-Bajocien constitue un système relativement continu (bien conservé le long de ses limites d'affleurement) ; Il s'étend sur environ 280 km² et n'est rencontré en affleurement que seulement sur 30 km². D'après la feuille géologique du Haut Atlas au Nord de Ksar Es Souk et de Boudenib, il repose presque en continue sur le Toarcien-Aalénien inférieur qui constitue son radier imperméable. Sa géométrie a été évaluée en adoptant la méthodologie présentée au paragraphe 4.1.1 ; La carte des isohypses du toit résultante est présentée sur la Figure 50.

Pour schématiser la structure interne de cette unité hydrogéologique, une coupe lithologique est représentée par la Figure 45 et située par la Figure 43.

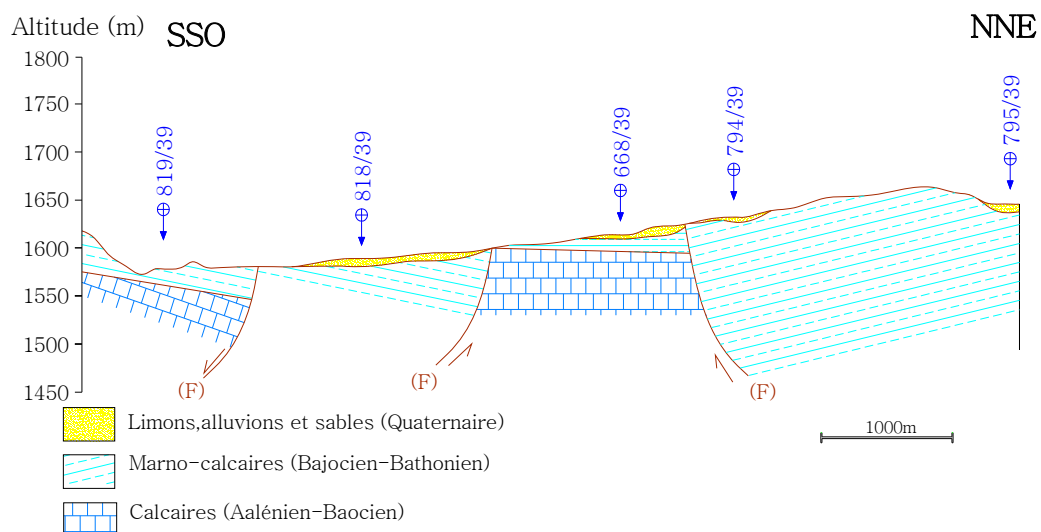


Figure 45 : Coupe géologique traversant l'unité « d'En-Nzala – Tazrouft » du complexe Aaléno-Bajocien

Conformément à l'analyse géologique et structurale, il s'agit d'une structure qui se caractérise par une succession de panneaux plus ou moins effondrés, recouvert par les marnes et marno-calcaires du Bajocien-Bathonien, puis parfois, par des alluvions ou des limons sableux plio-quaternaires. En raison de la profondeur relativement réduite des forages et l'espacement entre eux, les corrélations entre les coupes à l'échelle de cette unité semble parfois être difficile.

Les divers panneaux identifiés constituent des « marches » habituellement ascendantes et descendantes où quelques compartiments « hauts » ou « remontés » comme les panneaux des forages 819/39 et 668/39 peuvent être identifiés. Le réservoir aquifère montre donc, une structure hachée sous forme des horsts et grabens. À l'intérieur de ces structures, des petits panneaux, parfois très « hachés » sont susceptibles d'être rencontrés, ce qui peut limiter les potentialités hydrauliques de cette unité.

3) Unité d'Amgour – Tighattane

Géométrie et extension : Cette unité est sous forme d'un synclinale allongé et bien individualisé sur les cartes géologiques. Elle s'étend sur une superficie d'environ 340 km² et l'Aaléno-Bajocien n'est pas identifié sur les limites de cette unité. Il est rencontré seulement en profondeur grâce aux sondages électriques.

Les coupes géo-électriques de la Figure 46 reprennent toutes les données des sondages électriques disponibles pour schématiser la structure interne de cette unité hydrogéologique. Leur position est présentée dans la Figure 43.

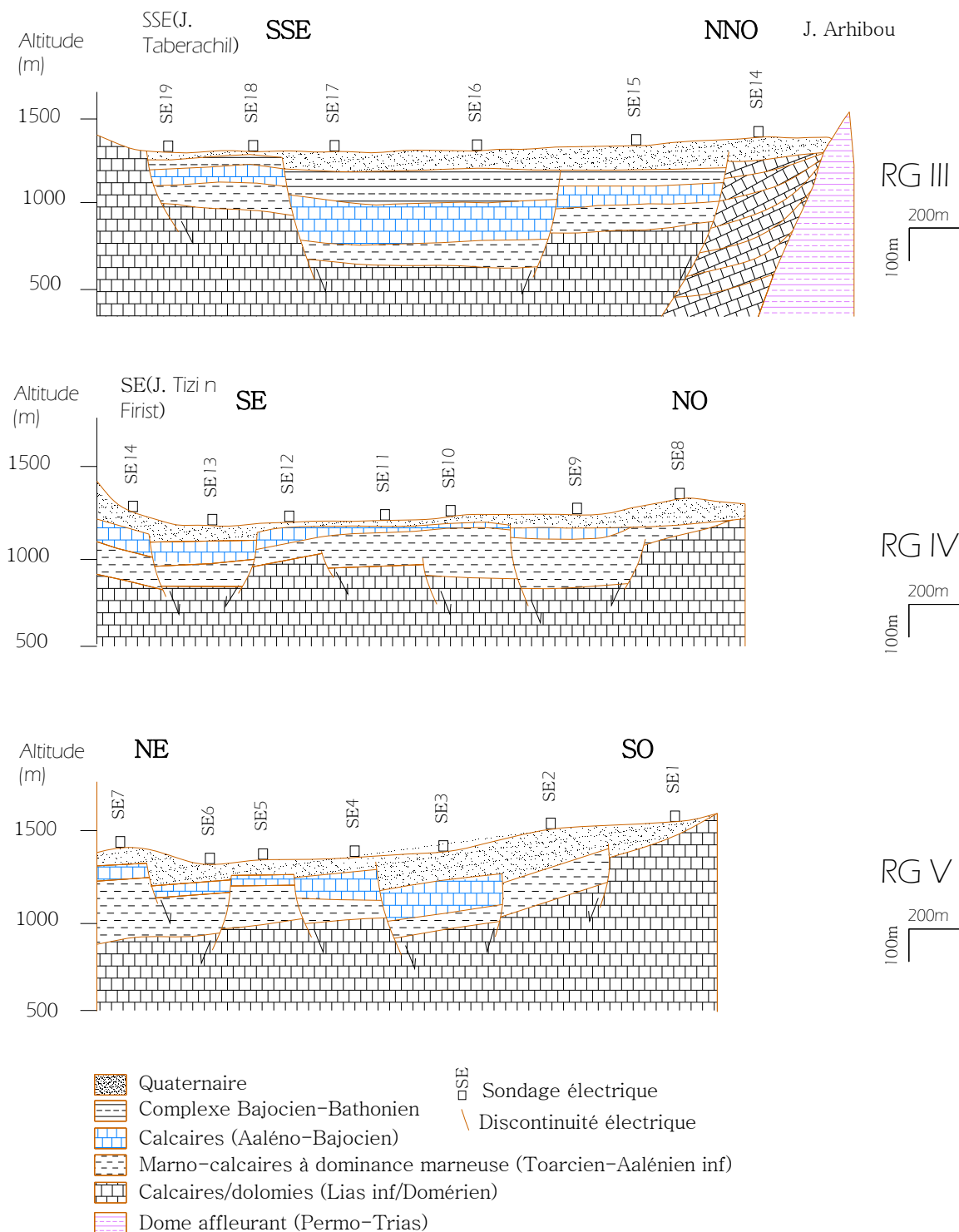


Figure 46 : Coupes géo-électriques traversant l'unité « Amgour – Tighattane » du complexe Aaléno-Bajocien

Il ressort de ces coupes que l'Aaléno-Bajocien est un système relativement discontinu, plus ou moins réduit, il montre, en général, une structure sous forme d'un bassin d'effondrement affecté par un ensemble de failles, en donnant naissance à des blocs basculés, habituellement descendantes conformément à la pente générale du bassin. Son toit se trouve à des profondeurs variables : il est à

38m/sol (RGIV-SE10), à 86m/sol (RGV-SE7), à 197m (RGV-SE3), à 312m/sol (RGIII-SE16). Ce réservoir repose en continu sur le substratum Toarcien-Aalénien inférieur, qui constitue son radier imperméable. Les isohypses du toit du complexe Aaléno-Bajocien résultants sont représentés sur la Figure 50.

4) Unité de Bou Izarmamine

Géométrie et extension : La structure de cette unité constitue une structure synclinale allongée et faillée, elle est bien conservée notamment dans sa partie sud. De point de vue structurale, elle est parfaitement délimitée sur les côtés suivants :

- + Au Sud-Ouest, le long du Jebel Assameur et Ich n'lkouane, le Trias occupe des bandes étroites, limitées par des failles de mêmes directions. Celle-ci sont souvent sub-verticales, deviennent parfois des chevauchements à vergence nord ou sud. Cette structure tectonique met en contact directe les formations triasiques imperméables et les calcaires aaléno-bajociens ;
- + Du côté sud de cette unité, l'Aaléno-Bajocien se trouve en contact normale avec les dépôts imperméables du Toarcien-Aalénien inférieur sous-jacents ;
- + Les autres limites ont été confondues arbitrairement à celles de la zone d'étude, où l'Aaléno-Bajocien se trouve caché sous les formations sus-jacentes.

L'Aaléno-Bajocien constitue un système relativement continu dans cette unité, où il affleure sur presque 90% de sa limite sud et Est, il s'étend sur environ de 358km² et il est rencontré en affleurement sur 38 km².

En absence de données de forages ou des sondages électriques, sa géométrie est évaluée en se basant sur les données des cartes géologiques disponibles et en suivant la méthodologie décrite au paragraphe 4.1.1. La carte des isohypses du toit de l'Aaléno-Bajocien résultante est présentée sur la Figure 50

Ainsi, ce réservoir aquifère montre, en général, une structure sous forme d'un synclinal de plus en plus profond vers les zones nord; à l'intérieur duquel, et selon la carte de fracturation (*Figure 21*), des petits panneaux, parfois très hachés peuvent être rencontrés.

Ce réservoir repose sur le substratum Toarcien-Aalénien inférieur qui constitue son radier imperméable. Ce réservoir est libre sur ses aires d'affleurements (zones sud) et son toit est assimilé à la topographie. En allant vers le nord, le toit de cette unité devient de plus profond, il se trouve entre 0m à 250m/sol dans les zones frontières sud. Au milieu il est rencontré à 500m en moyenne, au nord, il est rencontré entre 750 et 1000m/sol, qui est la profondeur maximale.

5) Unité Assoul – Ait Hani

Géométrie et extension : La structure de cette unité est sous forme d'un synclinal orienté NE-SO, large au milieu et étroit dans ses extrémités NE et SO. Elle est bien soutenue par le substratum Toarcien imperméable. Ce dernier accompagne l'Aaléno-bajocien en concordance chronologique le long de ses affleurements, à l'exception de la partie nord où le Trias affleure sous forme d'une bande étroite (à l'ouest du Jebel Amejgarh) sous l'effet de grands accidents mettant en contact direct, les calcaires Aaléno-Bajociens et les dépôts imperméables triasiques. La coupe de la Figure 47 reprend les données des forages disponibles, pour schématiser la structure de cette unité hydrogéologique. Sa position et représentée dans la Figure 43.

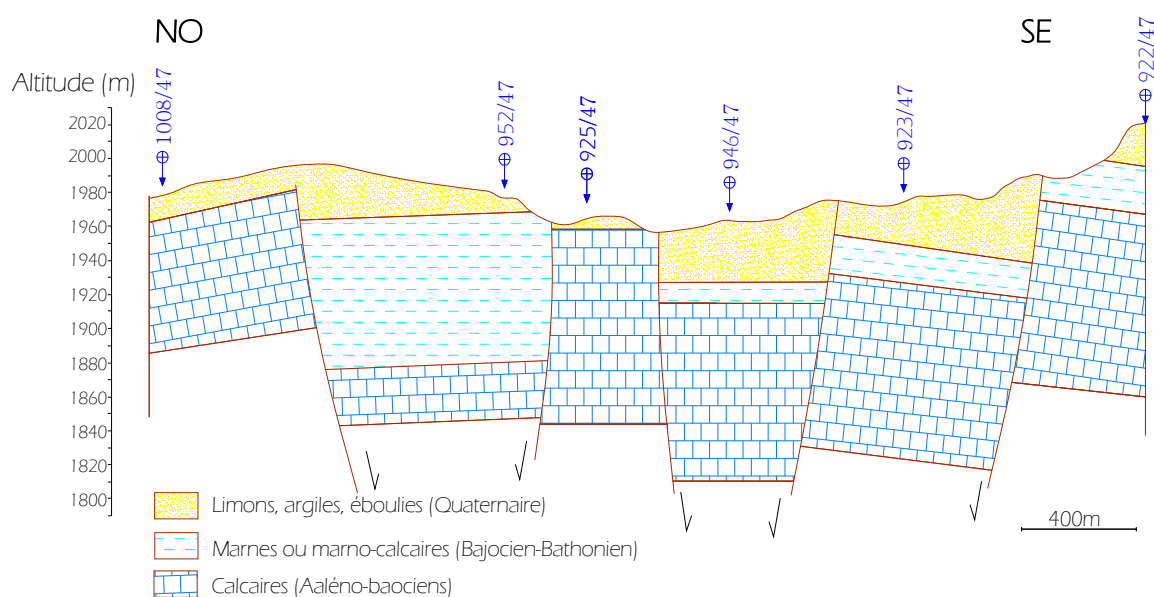


Figure 47 : Coupe géologique traversant l'unité «Assoul – Ait Hani» du complexe Aaléno-Bajocien. Il ressort de cette coupe que l'Aaléno-Bajocien est sous forme d'une succession de horst-grabens qui s'enfoncent progressivement sous l'effet des failles normales vers le centre de cette unité.

Sur cette unité, l'Aaléno-Bajocien s'étend sur environ de 1236 km² et il est rencontré en affleurement sur 357km², il est libre sur ses aires d'affleurements et son toit est assimilé à la topographie, il se trouve à des profondeurs variables mais relativement faibles. Il est à 7m (IRE 925/47), 48m (IRE 946/47) et 94m (IRE 952/47).

Selon les cartes géologiques disponibles, le substratum Toarcien-Aalénien inférieurs semble être un radier continu et généralisé dans cette unité, il accompagne l'Aaléno-Bajocien en concordance chronologique le long de ses aires d'affleurement.

La géométrie générale de cette unité est tracée en adoptant la méthodologie du paragraphe 4.1.1. Les isohypses du toit de ce niveau sont présentés sur Figure 50.

Il ressort de cette figure que l'Aaléno-Bajocien est sous forme de deux cuvettes profondes, séparées par une rampe peu profonde. Les profondeurs les plus importantes (500 à 750m/sol) sont obtenues au milieu des deux cuvettes. En se rapprochant des zones frontières, la profondeur diminue progressivement pour rejoindre les niveaux de la surface du sol.

6) Unité d'Igli – Rich

Géométrie et extension : Cette unité constitue une structure synclinale très allongée, elle s'étend sur un linéaire d'environ 120 km, elle est parfaitement délimitée sur les côtés suivants :

- + Au nord, ouest, le long du Jebel Assameur et Ich n'lkouane, le Trias occupe des bandes étroites, limitées par des failles de mêmes directions. Celles-ci sont souvent sub-verticales, parfois deviennent des chevauchements à vergence nord ou sud. Cette structure tectonique met en contact directe les formations triasiques imperméables avec les calcaires Aaléno-Bajociens.
- + Au sud, sur une linière de 105 km, l'Aaléno-Bajocien se trouve en contact normal avec le Toarcien-Aalénien inférieur sous-jacent,
- + Les autres limites du bassin ont été confondues arbitrairement à celles de la limite de la zone d'étude.

D'après les données géophysiques et les cartes géologiques disponibles, l'Aaléno-Bajocien est continu dans l'espace, il s'étend sur environ de 1340 km² et il est rencontré en affleurement sur 235 km². La structure interne de cette unité est schématisée en interprétant les données de 5 forages profonds et 4 coupes géo-électriques RGII, RGIII, RGIV, RGV (Figure 12).

Pour schématiser la structure interne de cette unité hydrogéologique, des coupes reprenant toutes les données des forages et sondages électriques sont représentées sur la Figure 48 et la Figure 49. Leurs positions sont représentées sur la Figure 43

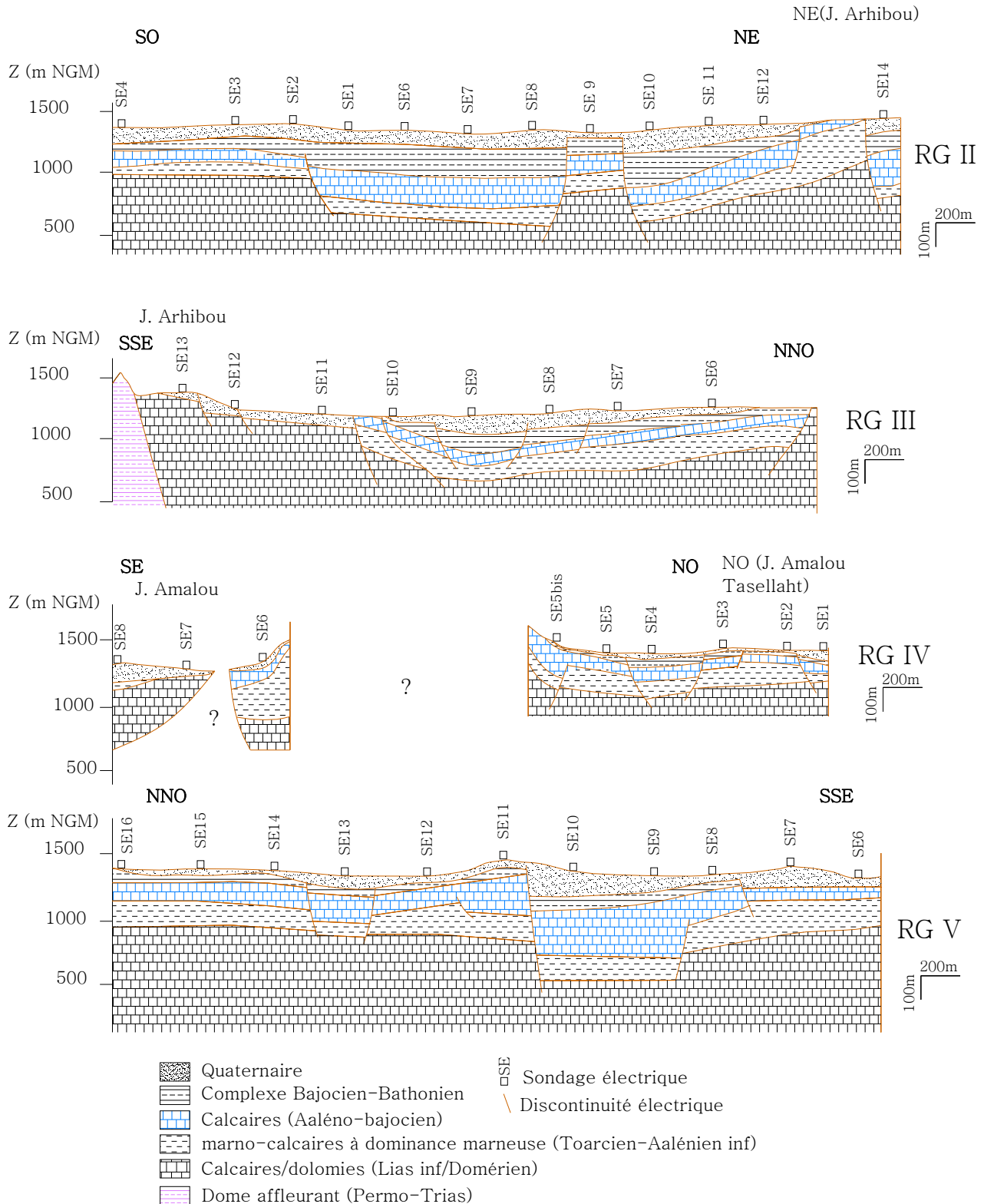


Figure 48 : Coupes géo-électriques traversant l'unité « Igli – Rich » du complexe Aaléno-Bajocien
D'après les données des sondages électriques, l'Aaléno-Bajocien constitue un système relativement continu, il montre, en général, une structure en horsts et grabens généralement descendantes, conformément à la pente générale du bassin, en raison d'un ensemble de failles normales et inverses.

Son toit se trouve à des profondeurs variables, il est à 88m (RGV-SE11), à 190m (RGII-SE9), à 285m (RGV-SE10), à 370m (RGII-SE7). Ce réservoir repose en continu sur le substratum Toarcien-Aalénien inférieurs qui constitue son radier imperméable.

Les données des forages disponibles montrent une structure encore plus hachée sous forme de blocs descendants et ascendants où quelques compartiments « hauts » ou « remontés » comme les blocs des forages 1594/38 et 847/39 sont identifiés (Figure 49).

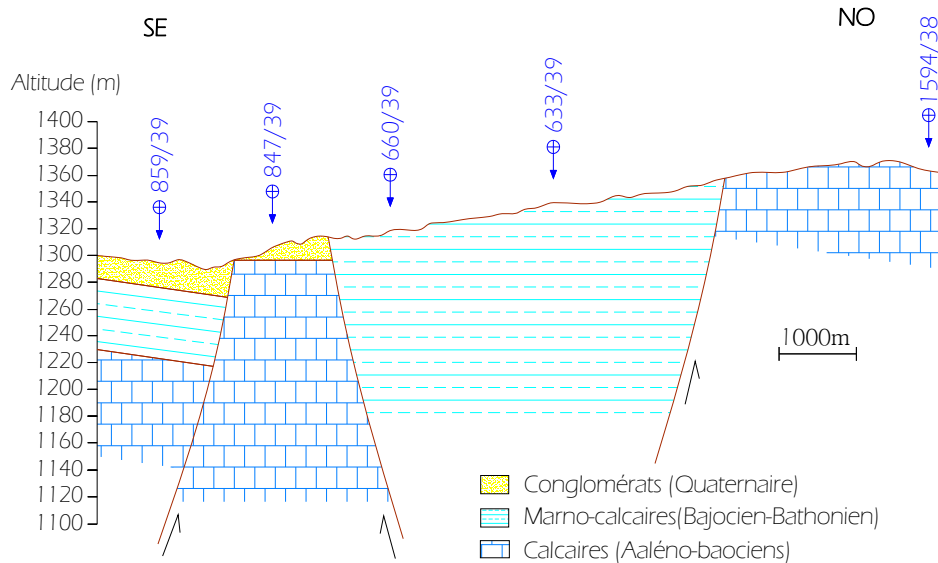


Figure 49 : Coupe géologique traversant l'unité « Igli – Rich » du complexe Aaléno-Bajocien

En raison de la profondeur relativement importante des blocs basculés, les corrélations entre les coupes des forages engendrent parfois des difficultés puisque leurs profondeurs ne permettent pas d'atteindre le toit de l'Aalénien en allant vers le centre du bassin dont les isohypses du toit sont représentés sur la Figure 50.

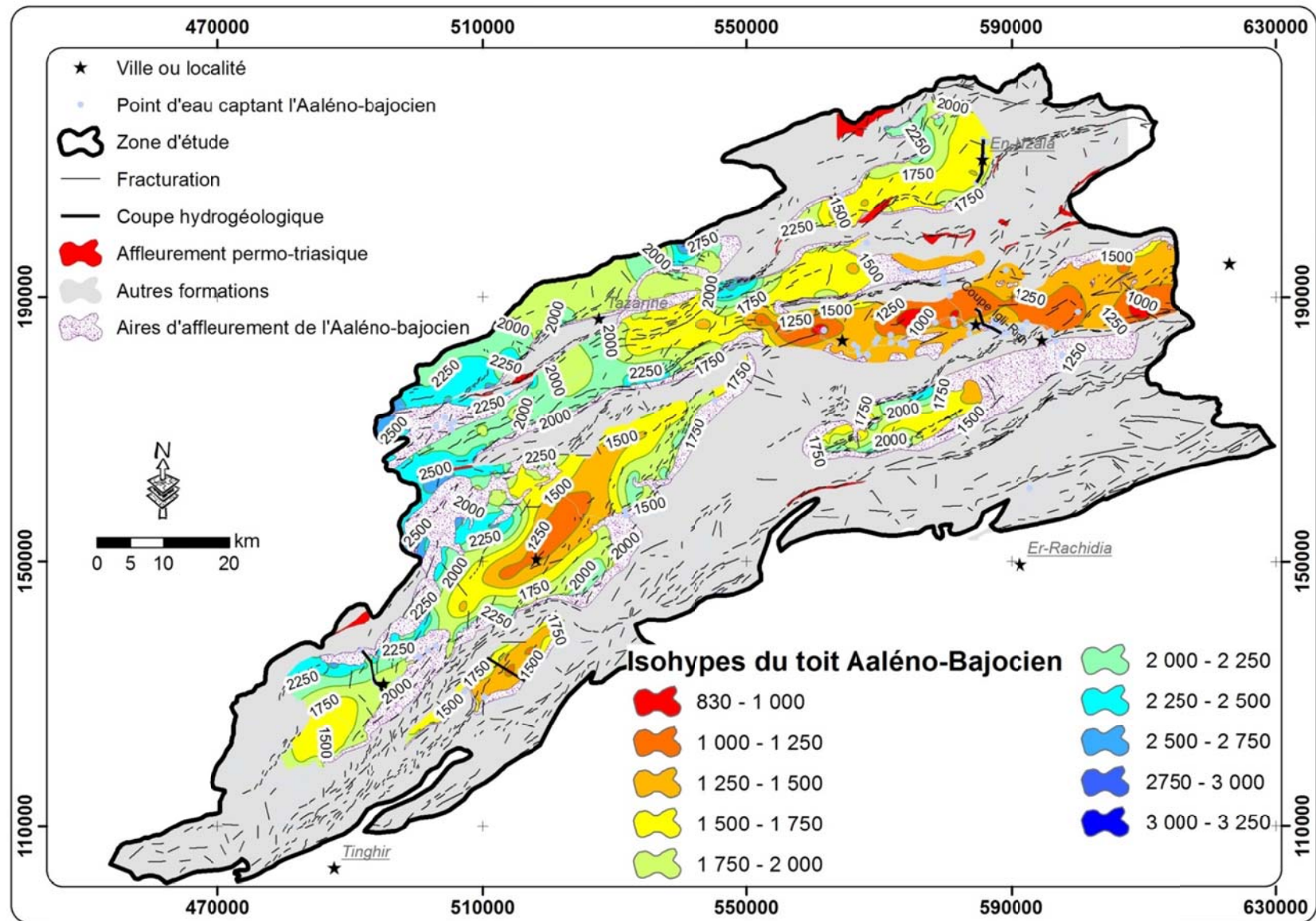


Figure 50 : Isohypes du toit des unités Aaléno-Bajociennes en mètre NGM

4.1.4 Systèmes aquifères du Bajocien-Bathonien

4.1.4.1 Découpage et caractérisation des unités hydrogéologiques

D'après l'analyse de faciès, le réservoir Bajocien-Bathonien, est représenté par le membre sommital de la formation de Tazigzaout, d'environ 100m de puissance. Il s'agit de la deuxième barre de calcaires à corniches. Ce réservoir potentiel coiffe d'éventuels réservoirs sous-jacents de moins importance, notamment les membres basal et intermédiaire de la formation de Tazigzaout. Il s'agit de plusieurs bancs calcaires intercalés soit avec des marnes jaunes-vertes et grises noires soit avec des marnes grise-bleues à aspect schisteux.

La géométrie et le schéma structural de ce réservoir sont évalués en interprétant essentiellement les coupes lithologiques des forages et sondages captant souvent ce réservoir, les cartes géologiques et dans un degré moindre, les sondages électriques qui ne couvrent qu'une faible partie des réservoirs identifiés. Les unités hydrogéologiques identifiées sont souvent développées à l'intérieur des extensions des unités Aaléno-Bajociennes. Très schématiquement, le Bajocien-Bathonien, est découpé en 9 unités structurales (Figure 51), qui correspondent chacune à des bassins hydrogéologiques plus ou moins indépendantes qui sont détaillées dans les paragraphes qui suivent.

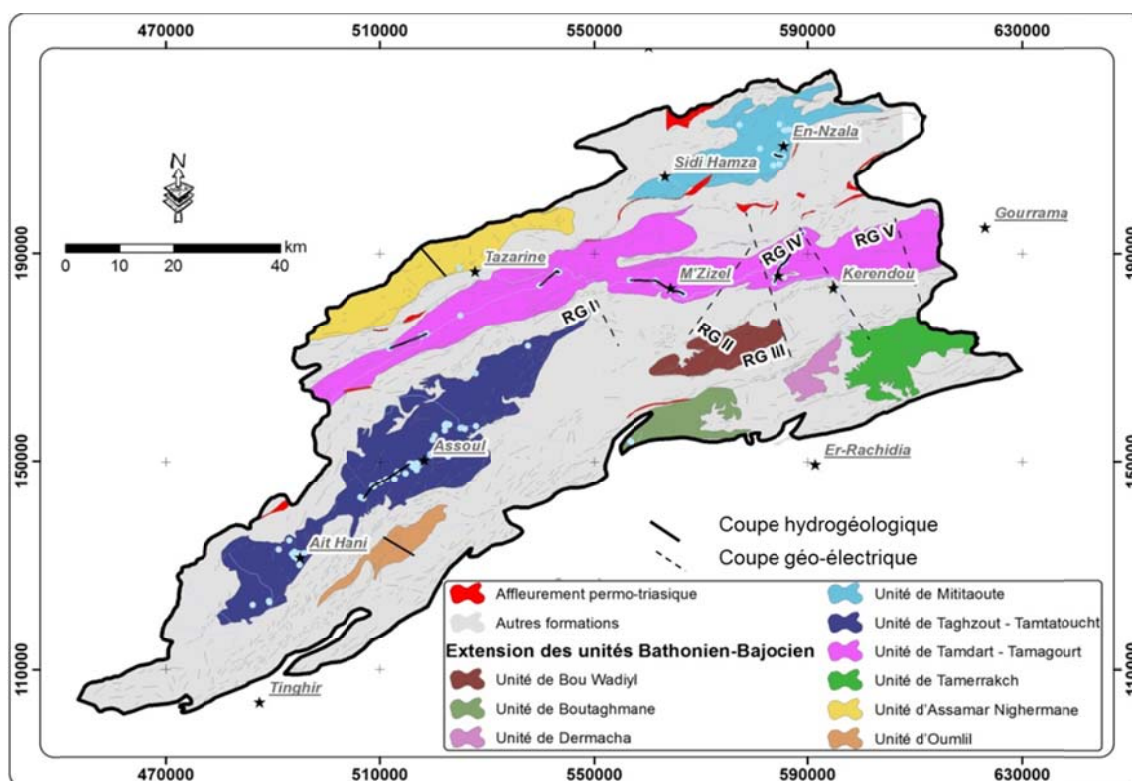


Figure 51 : Extensions des unités hydrogéologiques du complexe Bajocien-Bathonien

1) Unité de Mititaoute

➤ Géométrie et extension

Cette unité est sous forme d'un synclinal plus ou moins allongé, peu faillé et bien conservé. Elle est comblée essentiellement par des marno-calcaires à dominance marneuse. Des dépôts Plio-Quaternaires peuvent être rencontrés de part et d'autre des cours d'eau. Elle s'étend sur environ de 314 km² et elle est rencontrée en affleurement sur 314 km².

La structure interne de l'unité de Mititaoute, dressée sur sa bordure ESE (Figure 51) est représentée sur la Figure 52.

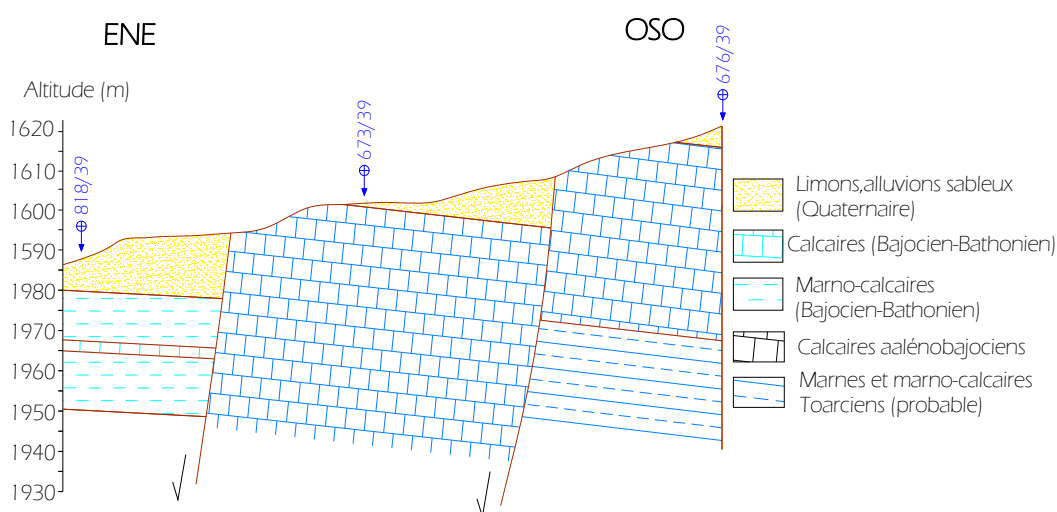


Figure 52 : Coupe géologique traversant l'unité de « Mititaoute » du complexe Bajocien-Bathonien

En allant de la bordure Est vers le centre de l'unité de Mititaoute, les calcaires Aaléno-Bajociens présentent des compartiments effondrés sous forme d'un demi-graben, laissant place à des marno-calcaires du Bajocien-Bathonien. Le toit de ce dernier est caractérisé par un niveau marneux sommitale, souvent non productif, intercalé parfois en profondeur avec des petits niveaux calcaires d'extension et de puissance probablement réduits (IRE : 818/39). Ces petits niveaux calcaires permettent d'assurer une certaine communication avec les niveaux calcaires de l'Aaléno-Bajocien à travers les zones des failles.

La morphologie du toit de cette unité est façonnée ici par la transgression et la tectonique du secteur où son épaisseur augmente depuis les bordures vers les zones centrales, selon la direction de basculement des compartiments. La structure générale de cette unité pourrait être schématisée comme un bassin d'effondrement, qui suit l'allure des calcaires compartimentés de l'Aaléno-Bajocien sous-jacents, formant ainsi une structure en demi-graben. Cette structure permet pendant le Bajocien-Bathonien un remplissage essentiellement marneux, parfois intercalés avec des niveaux de calcaires, formant ainsi des petits réservoirs, probablement discontinus. Ce schéma est conforme avec la

productivité des forages de ce secteur, où les débits fournis sont souvent aléatoires.

2) Unité d'Assamar Nighermane

Géométrie et extension : En absence des forages mécaniques, implantés sur cette unité, sa géométrie et son extension sont schématisées en exploitant la carte géologique du Haut Atlas de Midelt au 1/200 000. La coupe géologique établie ci-dessous, d'une orientation NNO-SSE (Figure 51), montre que le Bajocien-Bathonien est sous forme d'un synclinal à fond étendu, rempli essentiellement par des marnes intercalées parfois avec des niveaux calcaires. Une faille sub-v verticale au milieu de cette unité met en contact direct les faciès rouges terminaux (détritiques) du Bajocien et les marno-calcaires du complexe Bathonien-Bajocien (Figure 53).

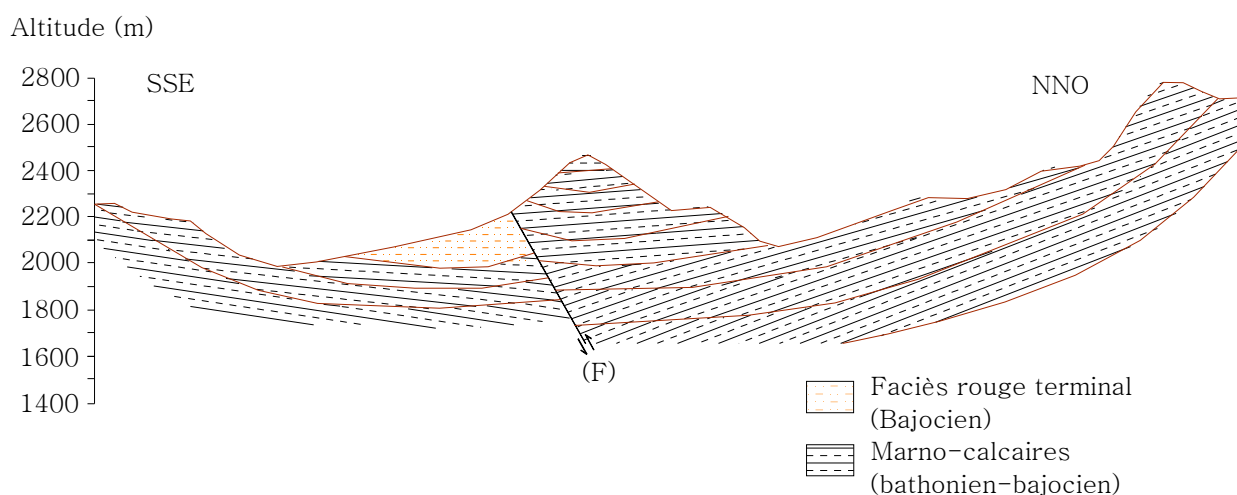


Figure 53 : Coupe géologique traversant l'unité de « d'Assamar Nighermane » du complexe Bajocien-Bathonien

Les dépôts marneux et marno-calcaires s'étendent sur environ 300 km² et ils sont rencontrés en affleurement, presque sur toute l'étendue de cette unité. Les niveaux calcaires, probablement réduits peuvent être le siège de petites nappes perchées.

3) Unité de Tamdart – Tamagourt

Géométrie et extension : Plusieurs forages mécaniques servent à schématiser la structure de cette unité. Cependant, en fonction de sa grande puissance, aucun forage n'atteint sa base malgré, leur profondeur importante. La structure de cette unité est appréciée en exploitant les coupes lithologiques de 18 forages allant jusqu'à 200m de profondeur, suivant 4 coupes géologiques qui sont situées sur la Figure 51 et présentées sur la Figure 54, la Figure 55, la Figure 56 et la Figure 57 ci-dessous.

De point de vue lithologique, cette unité est hétérogène, les niveaux susceptibles d'être des réservoirs aquifères (calcaires) sont discontinus, par exemple dans l'extrême ouest de cette unité (Figure 54), un niveau calcaire de plus de 75m de puissance est rencontré en affleurement (IRE 980/47). Ce niveau disparaît dans un autre forage voisin ayant 50m de profondeur (forage IRE 930/47). Un autre forage voisin (IRE 840/39) a montré la présence d'un mince niveau marneux qui coiffe un niveau de calcaires de plus de 50m de puissance.

Au centre de cette unité, les marnes deviennent dominantes (Figure 55), elles sont rencontrées depuis la surface jusqu'à 50m de profondeur (IRE 1543/38, IRE 1544/38, IRE 1545/38 et IRE 1746/38). Plus à l'est, la coupe de la Figure 56 a montrée la dominance des marnes dans les niveaux supérieurs (IRE 1574/38, 1587/38, 1601/38, IRE 1602/38). En profondeur, ces niveaux sont soit ils persistent et continus jusqu'à plus de 100m ou au-delà (IRE 1602/38), soit ils sont remplacés par des niveaux de calcaires (IRE 1601). Ce schéma est interrompu au droit du forage IRE 1588/38 qui ne présente que des calcaires jusqu'à 150m.

Plus encore à l'Est, la coupe de la Figure 57 traversant le centre de Rich, et située dans une zone caractérisée par des affleurements Aaléno-Bajociens, elle montre une dominance marneuse du Bajocien-Bathonien en allant vers l'axe du synclinal (IRE 632/38, IRE 633/38, IRE 636). Vers les extrémités du bassin, les niveaux marneux du Bajocien-Bathonien deviennent de plus en plus réduits ou disparaissent en faveur des calcaires Aaléno-Bajociens ou des marno-calcaires du Toarcien.

Il apparaît donc que cette unité est très hétérogène, sous forme d'intercalation de niveaux marneux et des niveaux calcaires. Ces derniers, qui constituent les niveaux réservoirs, sont souvent limités dans l'espace. En plus, ces niveaux calcaires sont occasionnellement rencontrés en affleurement ce qui réduit le taux d'alimentation en eau depuis la surface.

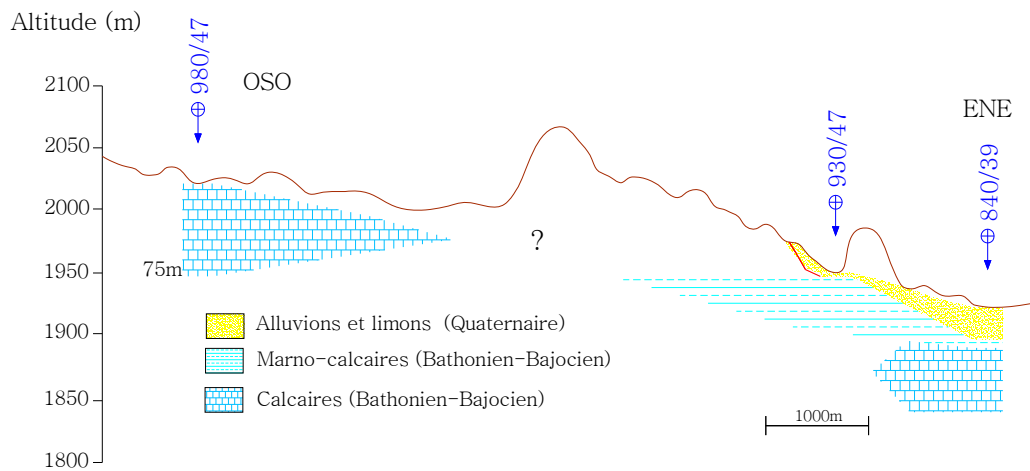


Figure 54 : Coupe géologique n°1 traversant l'unité « Tamdart – Tamagourt » du complexe Bajocien-Bathonien

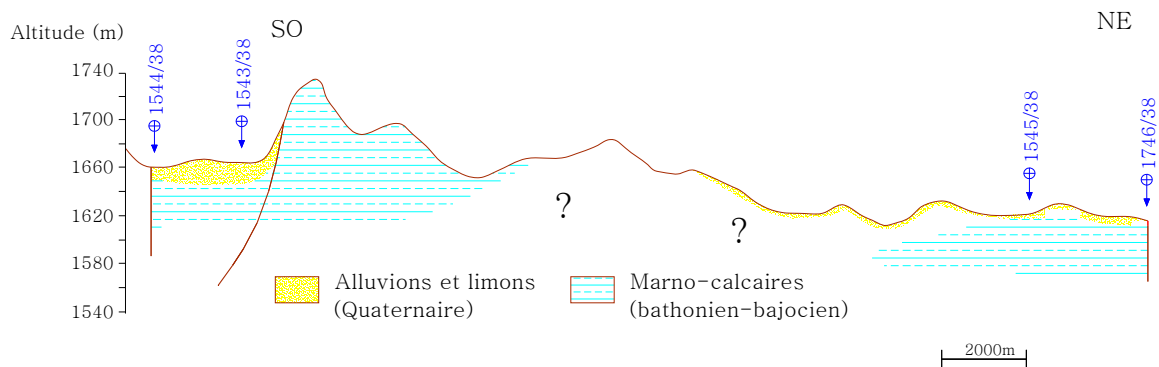


Figure 55 : Coupe géologique n°2 traversant l'unité « Tamdart – Tamagourt » du complexe Bajocien-Bathonien

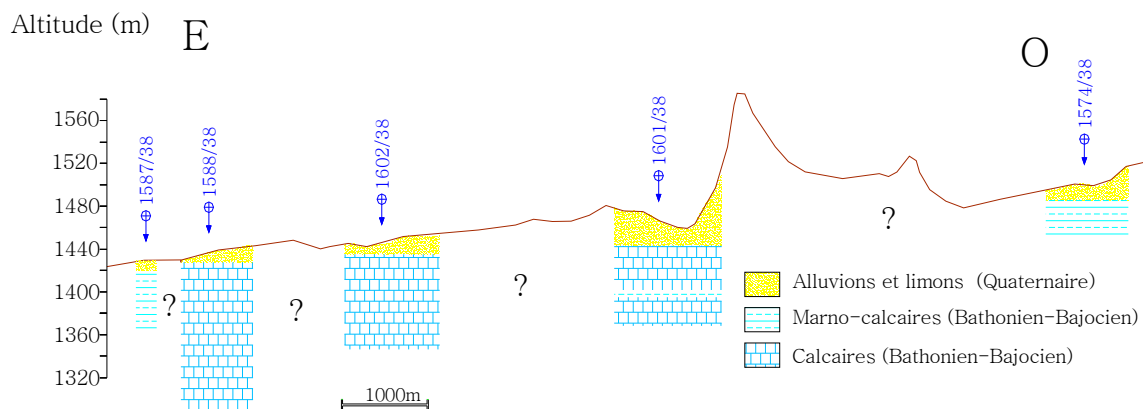


Figure 56 : Coupe géologique n°3 traversant l'unité « Tamdart – Tamagourt » du complexe Bajocien-Bathonien

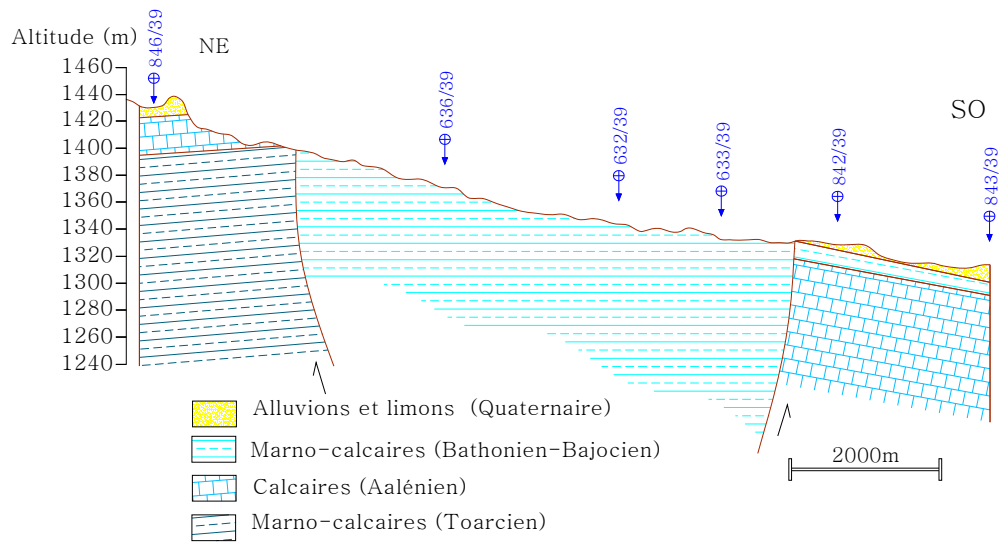


Figure 57 : Coupe géologique n°4 traversant l'unité « Tamdart – Tamagourt » du complexe Bajocien-Bathonien

4) Unité de Taghzout – Tamtatoucht

Géométrie et extension : La structure de cette unité est schématisée par les coupes lithologiques caractéristiques de 6 forages (Figure 58), allant jusqu'à 120m de profondeur et sont alignés suivant une direction NE-SO Figure 51.

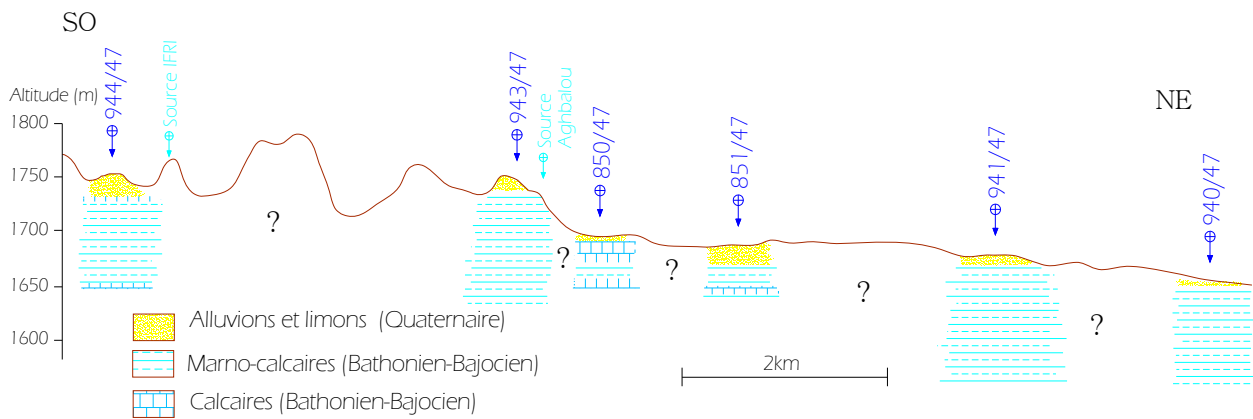


Figure 58 : Coupe géologique traversant l'unité « Taghzout – Tamtatoucht », du complexe Bajocien-Bathonien

Il ressort de cette coupe que cette unité est essentiellement marneuse. Des niveaux calcaires de puissance et d'extension très limités peuvent être rencontrés soit en surface (IRE 850/47), soit en profondeur, intercalés avec des niveaux de marnes (IRE 851/47, IRE 944/47).

5) Unité d'Oumlil

Vu l'absence des sondages électriques et des forages mécaniques, implantés dans cette unité, sa géométrie est schématisée par une coupe géologique établie à partir de la carte géologique du Haut Atlas de Midelt au 1/200 000. Cette coupe transversale de direction NO-SE (Figure 51), a montrée que les formations du Bajocien sont réduites au nord et s'enfoncent progressivement vers le sud, sous des puissants niveaux crétacés (Figure 59). Une faille sub-verticale à jeu inverse, bien identifié dans la carte géologique, a mis en contact direct le Bajocien avec le turonien et probablement avec les autres dépôts crétacés, ce qui permet de supposer que le Bajocien est une unité indépendante des autres unités du Haut Atlas.

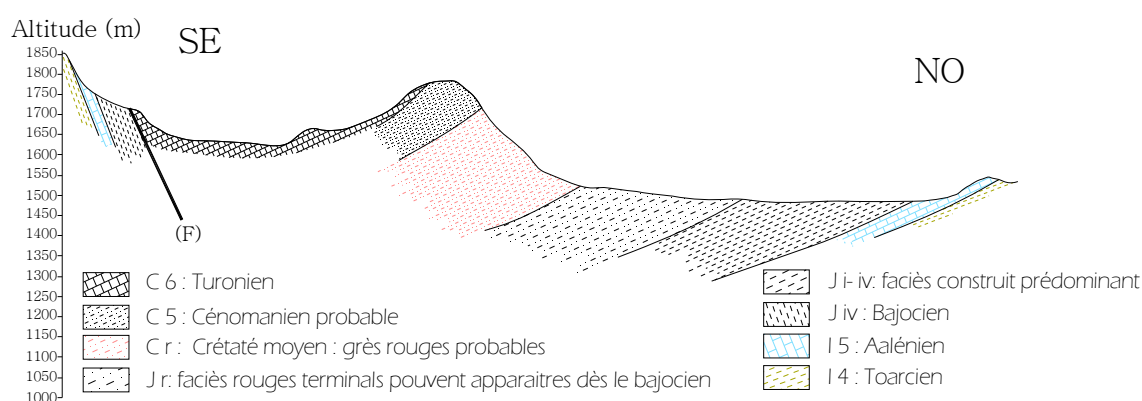


Figure 59 : Coupe géologique traversant l'unité « d'Oumlil » du complexe Aalénien-Bajocien

6) Autres unités

Ils sont au nombre de cinq (Figure 51). Vu l'absence des données suffisantes pour caractériser ces unités hydrogéologiques, leurs géométries ne seront pas traitées dans le cadre de cette thèse.

Tableau 14. Nomenclature et extensions des autres unités hydrogéologiques du Bajocien-Bathonien des hauts bassins de Ziz et Rhéris

Unité	Extension en km ²
Unité de Bou Wadiyl	130
Unité de Boutaghmane	126
Unité de Dermacha	54
Unité de Tamerrakch	198

4.2 Piézométrie des nappes

4.2.1 Méthodologie

L'analyse de la piézométrie des nappes a été faite à partir des données d'enquêtes de terrain et des données du réseau de suivi. Ces sources d'information constituent un fond de connaissance hydrogéologique de grand intérêt ; elles permettent notamment de disposer des situations de références et des données sur l'évolution dans le temps des nappes.

Dans le travail de cette thèse, l'étude de la piézométrie des nappes porte sur la structure de l'écoulement, la profondeur de l'eau et l'artésianisme, les zones d'alimentation et de décharge, le régime des nappes et l'impact des pompages (notamment agricoles et AEPI) sur l'évolution des nappes. Les zones ayant fait l'objet d'une esquisse piézométrique sont celles qui disposent suffisamment de points de mesures. En effet, il s'agit de 3 grandes zones :

- a) La zone orientale entre Tiallaline et En-Nzala, la zone sud centrale au nord de Lahroune et la zone sud-occidentale entre Tamtatouch et Ait Hani du complexe aquifère du Lias inférieur-Domérien ;
- b) La zone orientale de l'unité Igli – Rich entre les localités de Guers Tiaallaline et de Tamagourt et la zone sud occidentale de l'unité Amgour - Tighattane entre les localités de Tamtatouch et Ait Hani du complexe aquifère Aaléno-Bajocien ;
- c) L'unité de Mititaoute entre les localités d'En-Nzala et Ksar Tazrouft et la totalité de l'unité Taghzout - Tamtatouch du complexe aquifère du Bajocien-Bathonien.

L'établissement de ces esquisses tient compte notamment les éléments suivants :

- + Elimination des niveaux piézométriques qui correspondent à des nappes perchées indépendantes des nappes liasiques et du Dogger ;
- + Prise en considération de tous les niveaux piézométriques des points d'eau mesurés, évidemment pendant deux périodes différentes ; la fluctuation du niveau piézométrique est sans doute faible en raison de la faible sollicitation des systèmes aquifères profonds ;

- + Sources comme des points de résurgence des aquifères. Leurs côtes piézométriques correspondent aux altitudes, corrigées par les profondeurs à l'eau par rapport au sol. Elles sont raccordables aux charges hydrauliques des forages dans la région ;
- + Considération des failles majeures comme déterminantes de la structure des écoulements, sans pour autant anticiper, ni enfreindre les principes de la cartographie.

4.2.2 Données piézométriques disponibles

4.2.2.1 Réseau de suivi

Les nappes du Haut Atlas sont contrôlées par un réseau de suivi piézométrique, mise en place depuis l'année 2007 (ABHGZR, 2012) pour les nappes profondes et plus tard, vers l'année 2008 pour les nappes quaternaires. Toutes les données piézométriques ont été rassemblées, y compris celles d'anciens piézomètres. L'intérêt est certain, soit pour l'analyse de l'évolution piézométrique, soit pour la détermination du mode d'écoulement et de recharge.

Un travail préalable a été consacré à l'identification des anomalies, à partir de la lecture des graphes piézométriques obtenus. Ces anomalies ont été traitées par suppression des valeurs anormales encadrées par des mesures cohérentes.

Le Tableau 15, résume les données du réseau de suivi et les chroniques disponibles dans la zone d'étude :

Tableau 15. Réseaux de suivi et chroniques piézométriques disponibles au niveau de la zone d'étude

Nappe	Nombre de chroniques disponibles	Nombre de points mesurés récemment
Lias inférieur - Domérien	12	2
Aaléno-Bajocien	13	2
Bajocien-Bathonien	13	1
Nappe quaternaire de Rich	151	24

4.2.2.2 Enquêtes piézométriques

L'ABHGZR a réalisé, de Mai à Juillet 2008 et en année 2011, deux enquêtes hydrogéologiques couvrant la zone d'étude. Les objectifs de ces deux enquêtes sont la visite des exploitations agricoles et la réalisation de mesures hydrogéologiques (NP, Conductivité, Température et pH). Au total, 69 points d'eau ont été visités en 2008 (63 puits et 6 forages) et 1384 points d'eau en 2011 (1305 puits et

79 forages). Ils sont exploités et traités selon la démarche décrite au paragraphe 4.2.1 pour identifier la piézométrie des nappes étudiées.

4.2.3 Piézométrie de la nappe du Lias inférieur-Domérien

4.2.3.1 Réseau de suivi piézométrique

Le réseau de la surveillance piézométrique de la nappe du Lias inférieur - Domérien est très lâche, il est constitué par deux points d'observation seulement, situés dans le secteur du Rich et au piémont du Jebel Bouhamid. Ce réseau est mis en place depuis l'année 1990, les premières mesures remontent à l'année 2007. Les séries disponibles sont lacunaires. La position et les caractéristiques des points de mesures sont notées sur la Figure 61 et le Tableau 16.

Tableau 16. Réseau de suivi de la piézométrie de la nappe de Lias inférieur-Domérien (ABHGZR, 2012)

N°IRE	X (m)	Y (m)	Z (m)	Prof. tot.	Première mesure
922/39	593600	185200	1350	100	2007
2004/48	577500	177400	1215	100	2007

4.2.3.2 Profondeur de la nappe

La nappe au niveau des zones synclinales est souvent artésienne ; son aire d'artésianisme est schématiquement délimitée. Il est d'environ 250 km² au nord des localités d'Ait Hani et de Tamtatoucht, 300 km² au nord-ouest de la localité Lahroune et plus de 600km² entre Guers Tiallaline, En-Nzala et Ksar Tazrouft (Figure 60). En dehors de ces zones, le niveau de la nappe est compris entre 5 et 39 m dans les aires d'affleurement et entre 15 et 61.9 m ailleurs. Les profondeurs les plus importantes, qui dépassent 30 m, sont enregistrées entre Tamtatouch, Ait Hani.

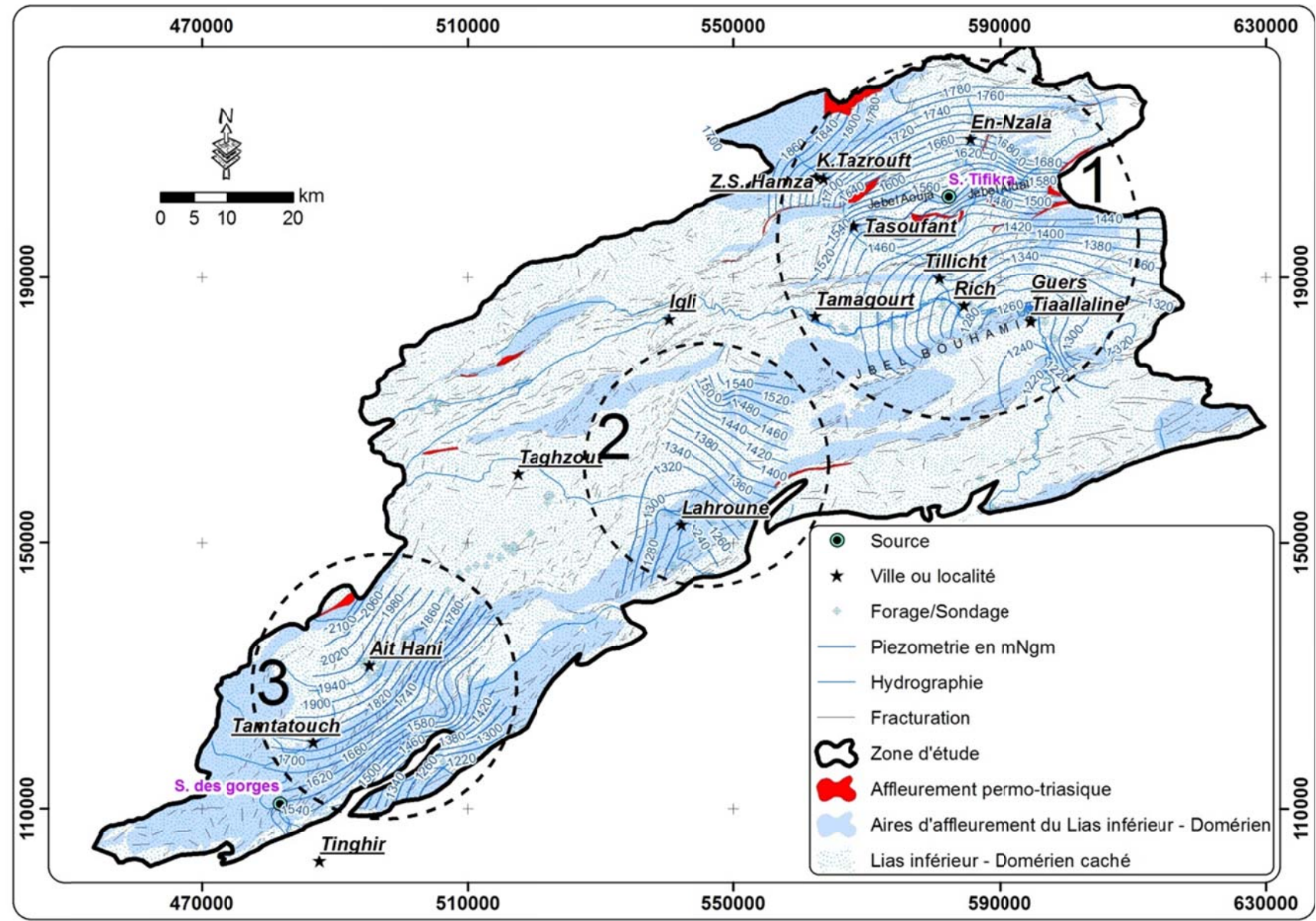


Figure 60 : Carte piézométrique du Lias inférieur – Domérien des hauts bassins de Ziz et Rhéris

4.2.3.3 Structure générale de l'écoulement et zones d'alimentation et de décharge

Selon les données disponibles, la piézométrie de l'aquifère du Lias inférieur - Domérien montre 3 axes d'écoulement majeurs :

Un premier axe dans le secteur oriental entre En-Nzala et Guers Tiaallaline où, l'écoulement général est N-S, avec quelques anomalies d'origine structurale ou sédimentaire. Le gradient hydraulique varie de 0.1% à 0.3% (Figure 61).

Le parallélisme des isopièzes observé entre En-Nzala et K. Tazrouft et l'absence d'anomalie dans ce secteur indique une certaine continuité hydraulique et l'absence des barrières étanches sédimentaires ou structurales (Figure 61). Au contraire, près de la localité de Tasoufant, des accidents tectoniques affectants le réservoir, se traduisent par des anomalies de la surface piézométrique, c'est le cas des crêtes anticlinales des Jebels Aouja, Afadal et Bouslim (Figure 61) d'origine tectonique, mises en place par des failles profondes (El Kochri, 1981). Ces structures identifiées aussi par la carte de fracturation (Figure 21), montrent une diminution brusque et anormale du module d'espacement et par un alignement des sources artésiennes, qui sont localisées sur des fractures profondes affectant toute la structure (ex : Source Tifikra). La zone de fracture joue, donc le rôle d'un barrage souterrain naturel par la mise en contact des formations de perméabilités différentes et de ce fait la création des pertes de charge (G. Castany, 1998) ;

Dans les zones synclinales, la mise en charge des eaux du Lias inférieur-Domérien par le Toarcien imperméable est fréquente. Le gradient hydraulique est plus faible (0.01% à 0.05%). Deux secteurs d'artésianisme jaillissants ont été identifiés : entre Tassoufant et Tillicht et autour de Rich (Figure 61), avec des pressions assez faibles (+ 0,1 à + 0.3 m selon les niveaux).

L'analyse de la morphologie de la surface piézométrique confrontée avec la géologie, dans les zones limites de l'aquifère apporte aussi des informations sur les conditions aux limites. Deux configurations ont été observées : une alimentation à partir des affleurements liasiques au nord de Zaouiat Sidi Hamza et au nord d'En-Nzala (Figure 61), mais dans ce dernier secteur, elle ne correspond pas uniquement aux affleurements du Lias qui sont relativement réduits (40 km²). Il existe sans doute une liaison hydraulique entre le Lias et les formations sus-jacentes. À la bordure des affleurements triasiques nord, les courbes hydroisohypses sont perpendiculaires, indiquant une limite étanche à débit nul (Figure 61). D'autre part, au sud de Guers Tiaallaline, les courbes isopièzes se convergent en donnant naissance à une zone de drainage préférentielle de la nappe (Figure 61).

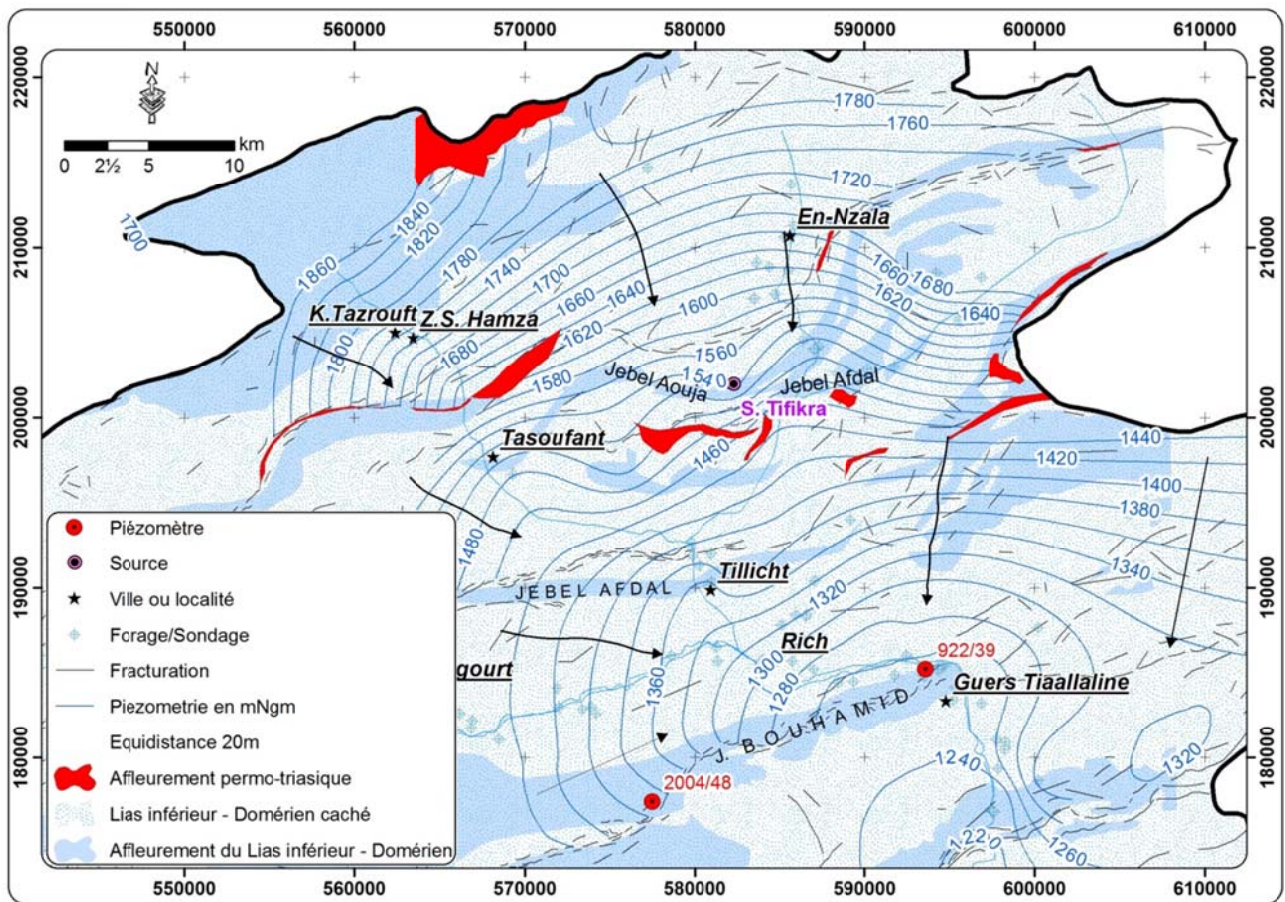


Figure 61 : Piézométrie du Lias inférieur - Domérien – Zone 1 de la Figure 60

Un second axe, dans le secteur sud-central au nord de Lahroune, où l'écoulement général est NE-SO, un parallélisme des isopièzes et un module d'espacement presque constant sont observés, indiquant une certaine continuité hydraulique des isopièzes et l'absence des barrières étanches séparant les niveaux aquifères (Figure 62). Ces isopièzes se convergent au droit de Lahroune montrant ainsi une zone de drainage potentielle, en donnant naissance parfois à des sources à caractère de déversement dû au rôle d'un niveau de moindre perméabilité dans le Lias, à proximité du Trias ou à une faille, éventuellement c'est le cas de la source de Tahamdount dont le débit moyen remonte à environ 275l/s (Figure 62).

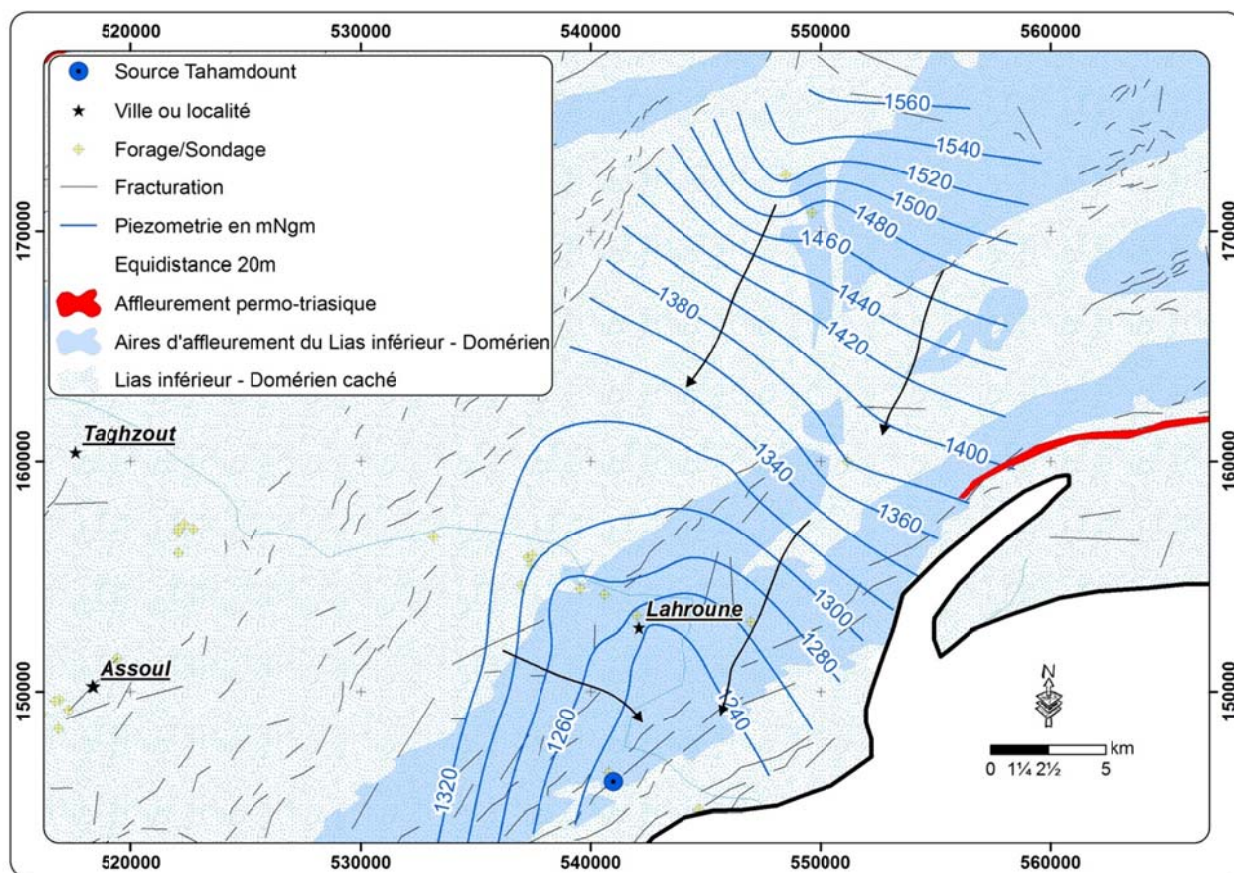


Figure 62 : Piézométrie du Lias inférieur - Domérien – Zone 2 de la Figure 60

Dans un troisième axe, dans le secteur sud-occidental entre Ait Hani et les sources des gorges, il existe une continuité relative des réseaux aquifères du Lias, sans que l'on puisse cependant parler d'un niveau piézométrique général. La continuité des circulations est probable, mais pas toujours certaine dans le centre des synclinaux, en raison des variations de faciès possibles. Toutefois, la présence d'un accident tectonique majeur, identifiée dans les cartes géologiques et la carte de linéaments (Figure 21) a provoqué la diminution du module d'espacement en donnant naissance à des gradients hydrauliques plus importants (Figure 63).

L'alimentation de la nappe provient de la pluie directe et du drainage en provenance des nappes bordières du nord (Figure 63). Dans ce secteur, la zone d'alimentation est sans doute très large, la raison à laquelle il existe des sources à forts débits (sources des gorges ; $Q_{\text{moy}} : 788\text{l/s}$)

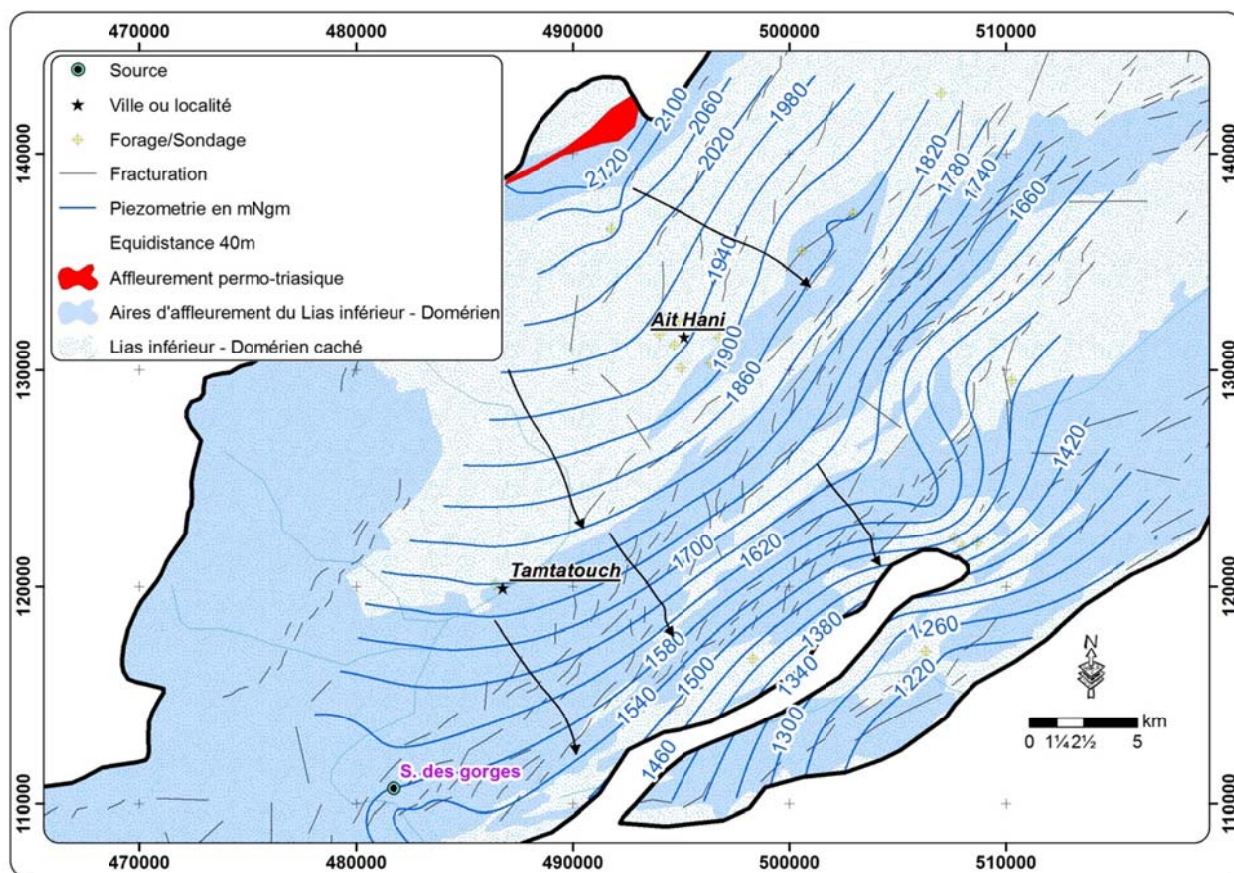


Figure 63 : piézométrie du Lias inférieur - Domérien – Zone 3 de la Figure 60

4.2.3.4 Evolution temporelle

Les graphiques de la Figure 64 présentent les historiques piézométriques disponibles (ABHGZR, 2012) au droit des forages d'eau 922/39 et 2004/48, captant le Lias inférieur-Domérien.

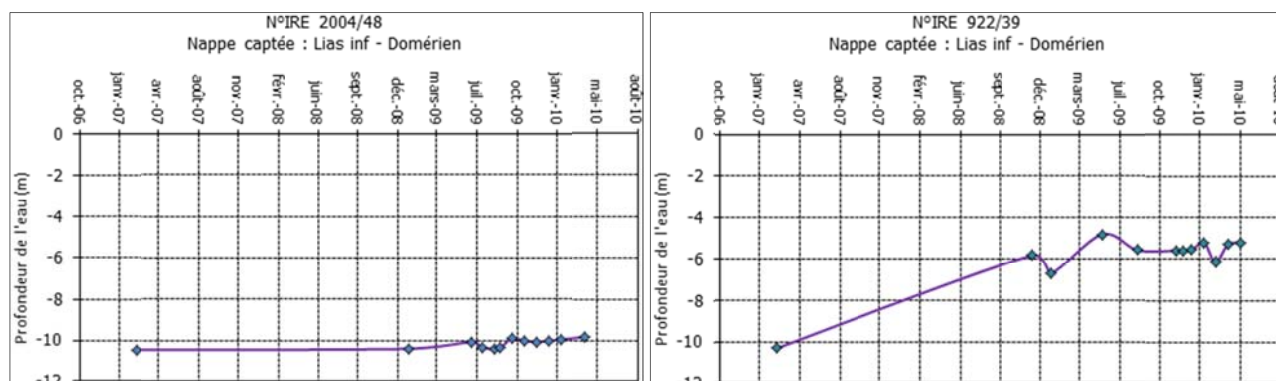


Figure 64 : Evolution piézométrique du Lias inférieur-Domérien dans le secteur de Guers Tiaallaline (ABHGZR, 2012)

L'examen de ces historiques suggère certaines remarques :

- + L'évolution piézométrique n'est pas homogène sur les deux secteurs de surveillance, mais les amplitudes restent relativement légères. Au droit du forage 2004/48, la piézométrie montre une stabilisation du niveau depuis 2007 jusqu'à 2010, les fluctuations ne dépassent pas 1m au maximum ;
- + Au droit du forage 922/39, et depuis 2007 jusqu'à 2009, des remontées du niveau piézométrique sont observées à la suite des événements pluvieux mais leurs amplitudes restent relativement faibles et la tendance générale est à la hausse.

Il ressort de ces observations que l'aquifère du Lias inférieur-Domérien se recharge relativement bien en périodes humides le long de la vallée de Ziz. Les remontées du niveau piézométrique peuvent être observées à la suite des événements pluvieux mais leurs amplitudes restent relativement faibles. Les périodes de relevés et les intervalles et amplitudes de variations observées sont données sur le Tableau 17.

Tableau 17. Amplitudes et intervalles de variations piézométriques du Lias inférieur-Domérien dans le secteur de Guers Tiaallaline (ABHGZR, 2012)

N°IRE	Première mesure	Dernière mesure	NB mesures	NP moy	NP min	NP max	Max-Min
922/39	2007	2010	13	-5.97	-10.3	-4.81	5.49
2004/48	2007	2010	12	-10.15	-10.46	-9.82	0.64

4.2.4 Piézométrie des nappes de l'Aaléno-Bajocien

4.2.4.1 Enquêtes piézométriques

Les données des enquêtes utilisées sont celles indiquées au paragraphe 4.2.2.2.

4.2.4.2 Réseau de suivi piézométrique

Le réseau d'observation disponible est aussi très lâche, il est représenté par deux points d'observations qui surveillent seulement l'unité hydrogéologique d'Igli – Rich. Les observations disponibles remontent à l'année 2007 et sont fortement lacunaires. La position et les caractéristiques du réseau de suivi sont données sur la Figure 65 et sur le Tableau 18.

Tableau 18. Réseau de suivi piézométrique des nappes aaléniennes (ABHGZR, 2012)

N°IRE	X (m)	Y (m)	Z (m)	PT (m)	Mise service en	Type	Etat	Première mesure
1604/38	579800	192350	1400	193	2007	Forage	Bon	26/02/2007
923/39	584500	185150	1330	100	2007	Forage	Bon	11/03/2007

Les piézomètres d'observation 1604/38 et 923/39 captent l'Aaléno-Bajocien respectivement au droit de la cluse de Foum Tillicht et près de la localité de Rich. Ils ne traversent que partiellement les premiers niveaux productives de l'Aaléno-Bajocien. Leur situation est représentée sur la Figure 65 ci-dessous.

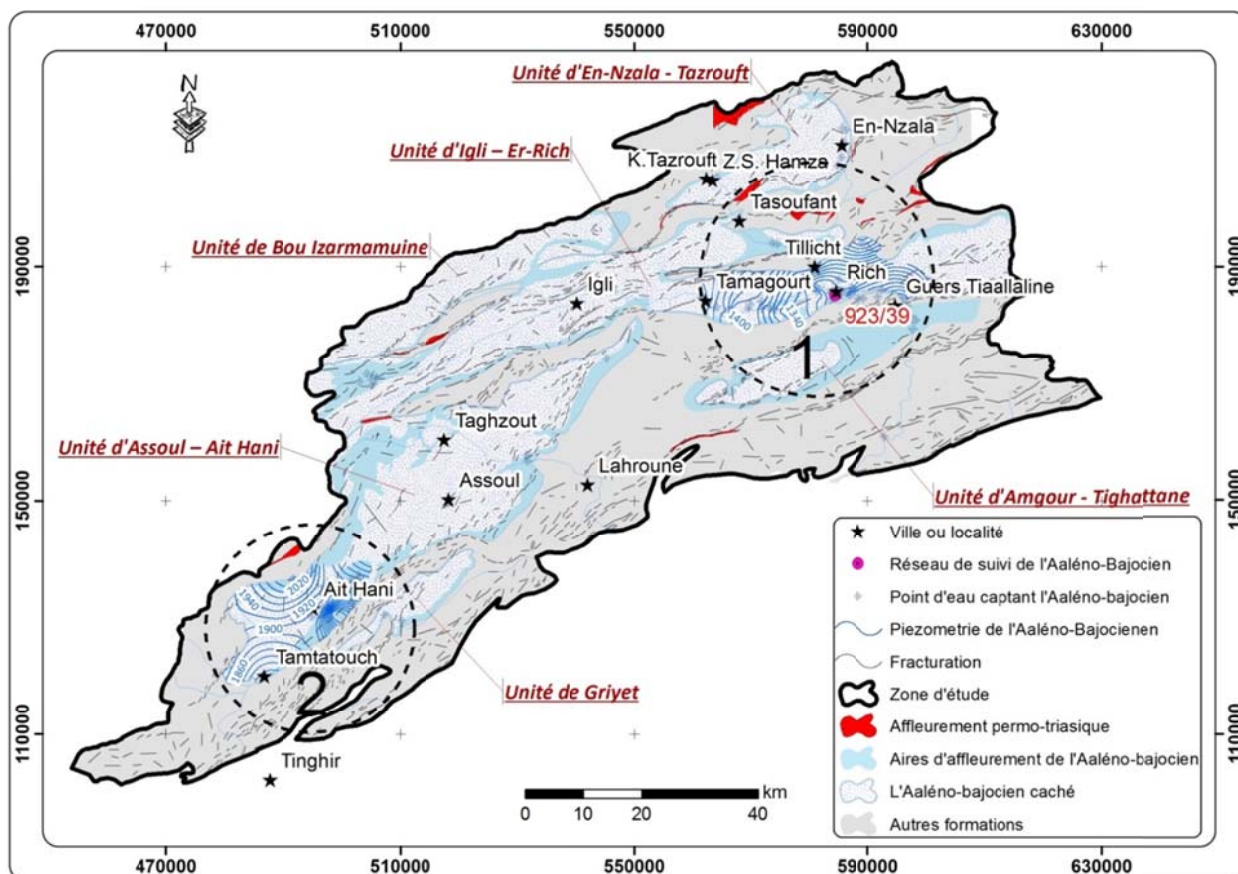


Figure 65 : Carte piézométrique des nappes Aaléno-Bajociennes

4.2.4.3 Profondeur des nappes

Les profondeurs des nappes sont appréciées seulement au niveau des unités hydrogéologiques d'Igli – Rich et d'Assoul – Ait Hani. Les profondeurs traduites en termes de niveaux piézométriques montrent qu'au niveau des zones d'affleurement, les profondeurs de la nappe (unité Igli – Rich), sont entre 5 et 27.4 m et entre 7.4m et 61.55m au niveau de l'unité Assoul – Ait Hani. Dans les zones en charge, les niveaux d'eau sont plus profonds ; les secteurs où les nappes sont en charge sont ceux situés dans les zones synclinales.

4.2.4.4 Structure générale de l'écoulement

Au niveau de l'unité Igli – Rich entre Tamagourt et Guers Tiaallaline, la piézométrie montre deux axes d'écoulement majeurs (Figure 66).

Entre Tamagourt et Rich, l'écoulement général des eaux souterraines se fait de l'ouest vers l'est avec un gradient hydraulique constant de près de 2 ‰, montrant ainsi un écoulement uniforme et une alimentation depuis l'ouest et le nord-ouest. Ce régime exige un aquifère homogène à épaisseur relativement constante (Castany G, 1988) ; (Figure 66).

Entre Tillicht et Guers Tiaallaline, l'écoulement souterrain devient du nord vers le sud selon un axe préférentiel qui coïncide avec l'exutoire naturel qui est la cluse séparant l'unité Igli – Rich et l'unité Amgour – Tighattane au sud. Le gradient hydraulique est décroissant cette fois-ci, montrant un écoulement non uniforme, en relation probable avec la nature lithologique hétérogène du réservoir aquifère dans ce secteur (Figure 66).

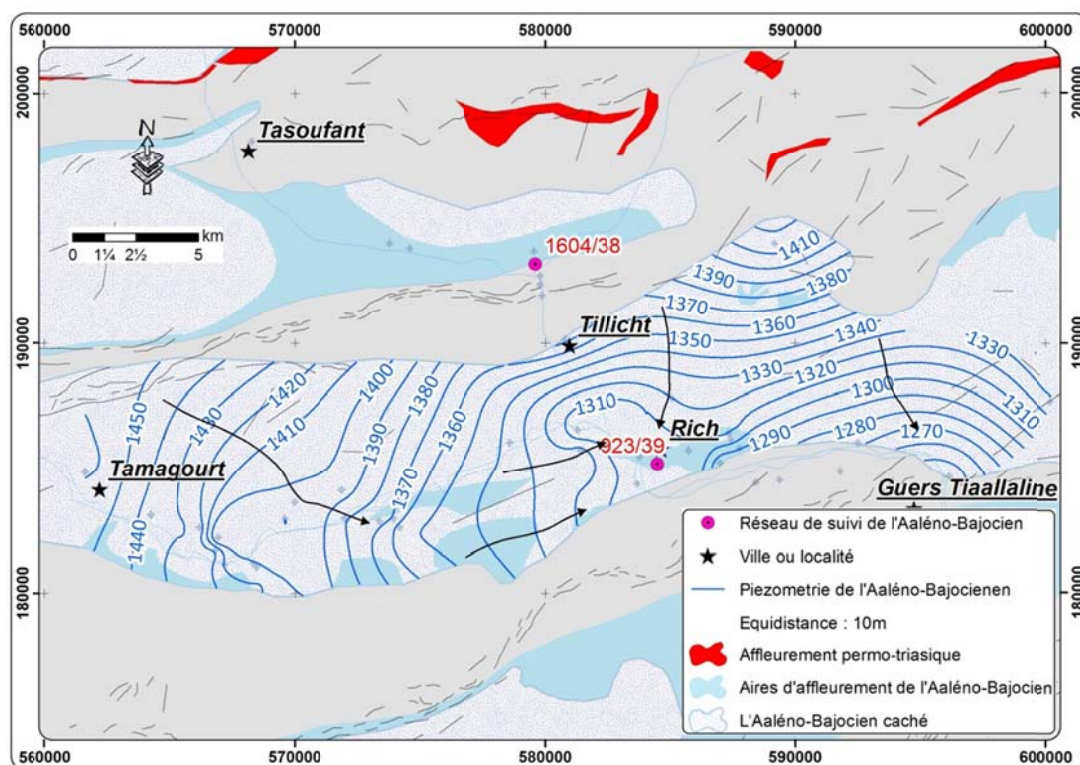


Figure 66 : Piézométrie de l'unité Aaléno-Bajocienne « Igli-Rich », Zone 1 de la Figure 65

Au niveau de l'unité d'Assoul – Ait Hani et à l'ouest des localités de Tamtatouch et d'Ait Hani, la piézométrie montre aussi deux axes majeurs d'écoulement (Figure 67). Entre les localités d'Ait Hani et Tamtatouch, l'écoulement des eaux souterraines se fait du nord vers le sud avec un gradient

hydraulique presque constant de près de 1.5 ‰, montrant ainsi un écoulement uniforme et une relative homogénéité lithologique et structurale du réservoir aquifère. L'alimentation ici se fait à partir des aires d'affleurement du nord (Figure 67).

A l'Est de la localité d'Ait Hani, l'écoulement souterrain devient du sud-est vers le nord-ouest attestant une alimentation depuis les aires d'affleurement Aaléno-Bajociens proches, plus à l'Est. Le gradient hydraulique cette fois-ci est supérieur (environ 2.5‰), éventuellement en relation avec une perméabilité relativement plus faible ou plutôt une zone de fracturation (Figure 67).

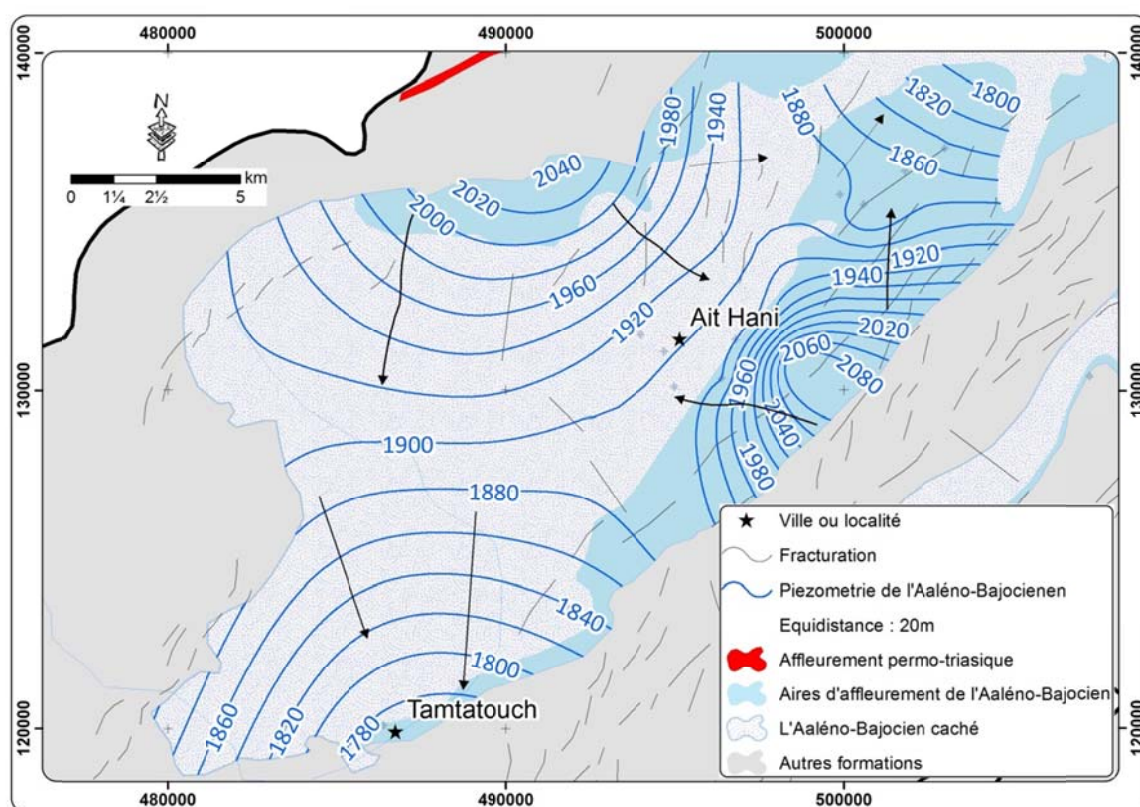


Figure 67 : Piézométrie de l'unité Aaléno-Bajocienne « Assoul-Ait Hani », Zone 2 de la Figure 65

4.2.4.5 Evolution temporelle

L'évolution dans le temps de la piézométrie des nappes Aalén-Bajociennes est illustrée par les graphiques de la Figure 68. Les mesures disponibles ne représentent que les zones orientales de l'unité hydrogéologique Igli – Rich. Elles ne peuvent pas être extrapolées aux autres aquifères.

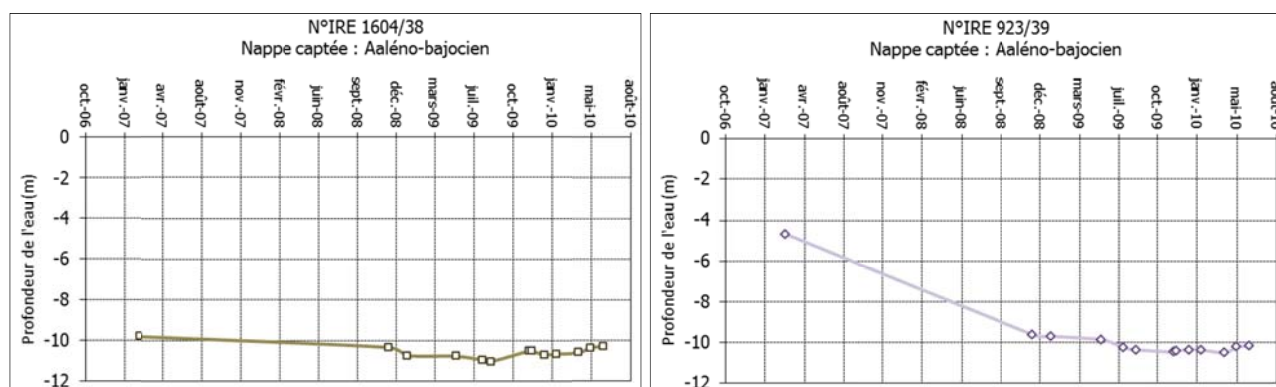


Figure 68 : Evolution piézométrique dans la nappe Aaléno-Bajocienne d'Igli – Rich

Sur le point d'observation N°IRE 1604/38, une stabilisation des niveaux le long des périodes de mesures est notée, le régime hydrogéologique est influencé par les apports d'oued Sidi Hamza qui temporisent les fluctuations piézométriques. À partir de décembre 2008, la nappe présente quelques fluctuations inter-cycliques de faibles amplitudes qui sont liées à des épisodes secs et humides. L'amplitude des remontées et déclin entre deux mesures successives varie de 0.52 m à 0.53 m.

Sur le point d'observation N°IRE 923/39, une baisse très significative entre mars 2007 et novembre 2008 est notée, puis une stabilisation jusqu'à juin 2010 avec quelques fluctuations inter-cyclique de faibles amplitudes. La baisse enregistrée est le résultat d'un déficit pluviométrique et une augmentation des prélèvements par pompage. Les fluctuations inter-cycliques sont fonction de la succession d'épisodes secs et humides.

L'amplitude des remontées et des chutes entre deux mesures successives varie de 0.24 m à 4.94 m.

4.2.5 Piézométrie des nappes du Bajocien-Bathonien

4.2.5.1 Enquêtes piézométriques

Les données des enquêtes utilisées sont celles indiquées au paragraphe 4.2.2.2.

4.2.5.2 Réseau de suivi piézométrique

Le réseau de la surveillance piézométrique des nappes du Bajocien-Bathonien a été mis en place depuis l'année 2007, il est constitué par un seul forage, implanté sur l'unité de Mititaoute. Les premières mesures remontent à l'année 2007 et la série disponible est lacunaire. La position de ce point de suivi est présentée sur la Figure 69 et ses caractéristiques sont présentées au Tableau 19.

Tableau 19. Réseau de suivi de la piézométrie des nappes du Bajocien-Bathonien

N°IRE	X (m)	Y (m)	Z (m)	PT (m)	Mise en service	Etat	Première mesure
918/39	584.4	208.15	1603	100	2007	Bon	Janvier 2007

Ce piézomètre ne traverse que partiellement les premiers niveaux calcaires de l'unité de Mititaoute avec un niveau d'eau relativement constante toute l'année (environ 10m/sol).

4.2.5.3 Structure générale de l'écoulement

La piézométrie des aquifères du Bajocien-Bathonien a été appréciée au niveau des unités hydrogéologiques de Mititaoute et de Taghzout - Tamtatoucht (Figure 69) qui disposent suffisamment de mesures piézométriques.

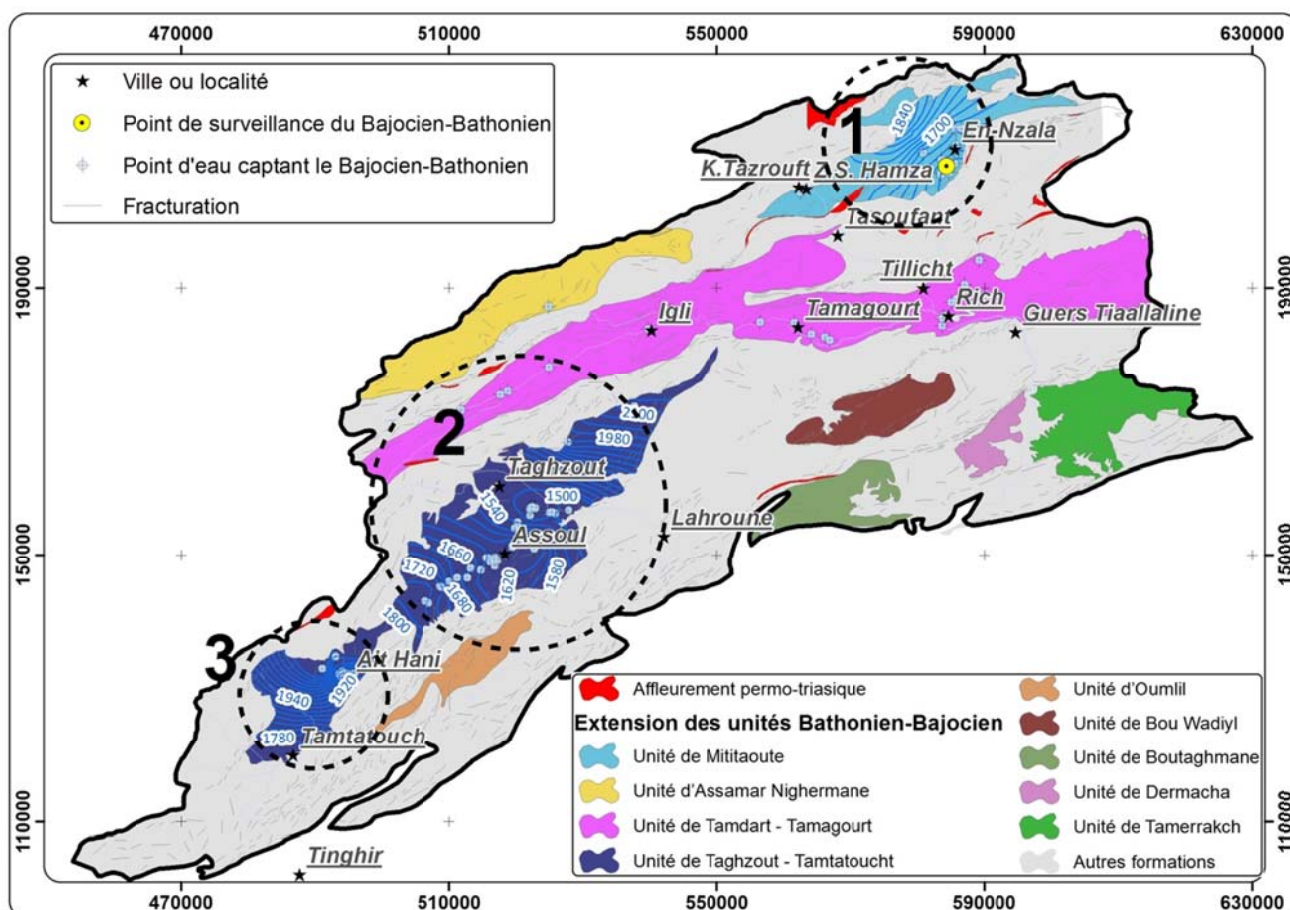


Figure 69 : Carte piézométrique des nappes du Bajocien-Bathonien

Au niveau de l'unité Mititaoute, l'écoulement est généralement homogène avec quelques anomalies, il se fait du nord-ouest vers le sud-est en direction de l'exutoire final qui est la cluse d'En-Zala. La structure de l'écoulement dans cette unité apparaît influencée par les écoulements

superficiels d'oued N'Zala; Les isopièzes au droit de la localité d'En-Zala subissent certains changements de direction (convergence), ce qui atteste une alimentation de ce cours d'eau par les sous-écoulements souterrains (Figure 70).

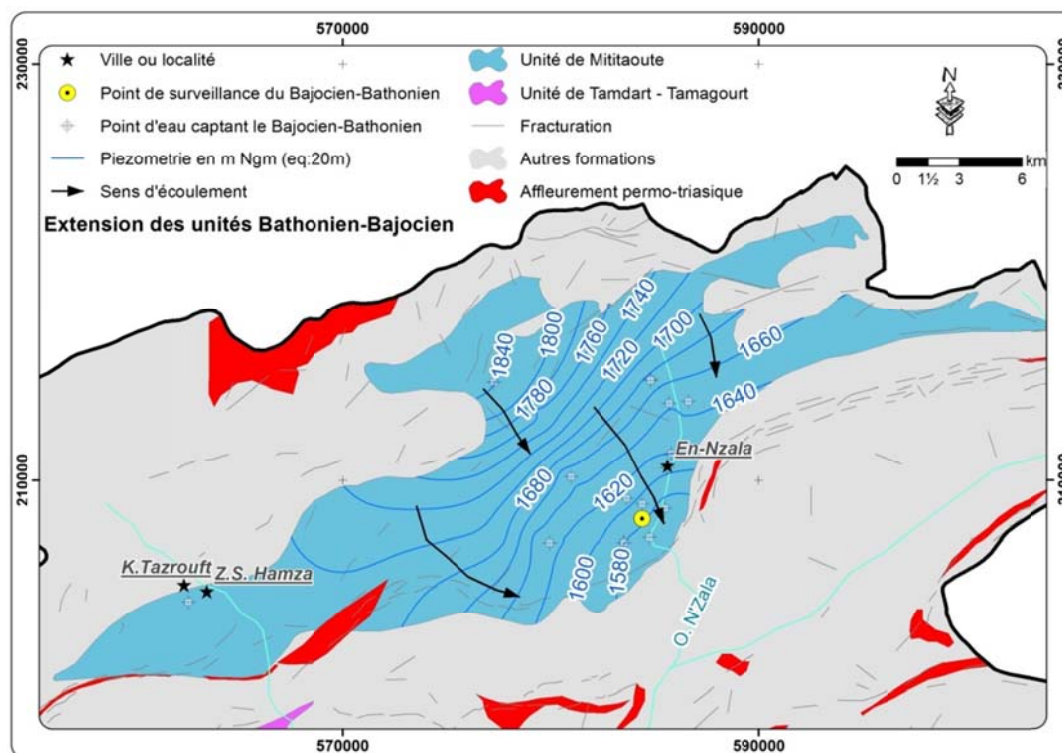


Figure 70 : Piézométrie de l'unité Mititaoute du Bajocien-Bathonien, Zone 1 de la Figure 69

Dans la zone nord orientale de l'unité Taghazout - Tamtatoucht, deux axes d'écoulement majeurs sont identifiés, le premier du NE vers le SO, compris entre l'isopièze 1480 m et 2140 m, le deuxième du SO vers le NE, compris entre les isopièzes 1480 m et 1800 m. Ces deux zones sont séparés par une dépression piézométrique (isopièze 1500 m) qui correspond à une zone de drainage de la nappe. À partir de cette dépression piézométrique, les isopièzes subissent certains changements de direction (convergence) de part et d'autre d'oued Rhéris), ce qui atteste son alimentation par les sous-écoulements de cette unité hydrogéologique (Figure 71).

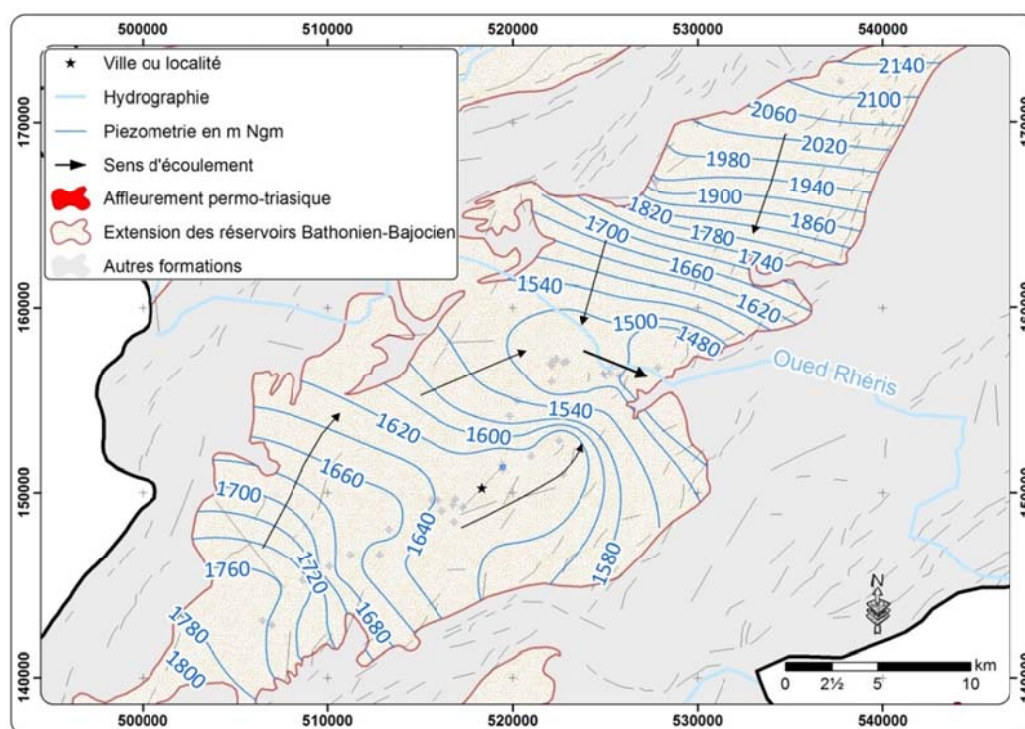


Figure 71 : Piézométrie de l'unité Taghzout-Tamtatoucht du Bajocien-Bathonien – Zone 2 de la Figure 69

Dans la zone sud-occidentale de l'unité Taghazout - Tamtatoucht, un seul axe d'écoulement majeur est identifié du nord vers le sud. Cet axe, compris entre l'isopièze 1760 m et 2080 m montre un gradient hydraulique un peu plus élevé (environ 3‰) par rapport aux autres zones de cette unité et une alimentation à partir des zones nord (Figure 72).

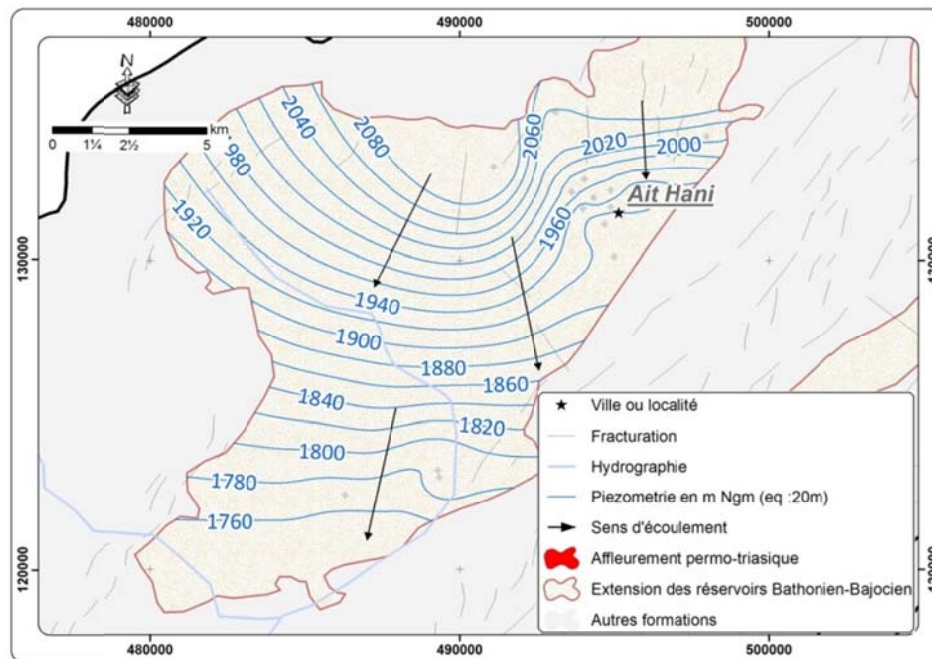


Figure 72 : Piézométrie de l'unité Taghzout-Tamtatoucht du Bajocien-Bathonien – Zone 3 de la Figure 69

4.2.5.4 Evolution piézométrique

La piézométrie de la nappe du Bajocien-Bathonien est appréciée par les mesures du piézomètre 918/39 (Figure 73), implanté au niveau de l'unité Mititaoute (Figure 70).

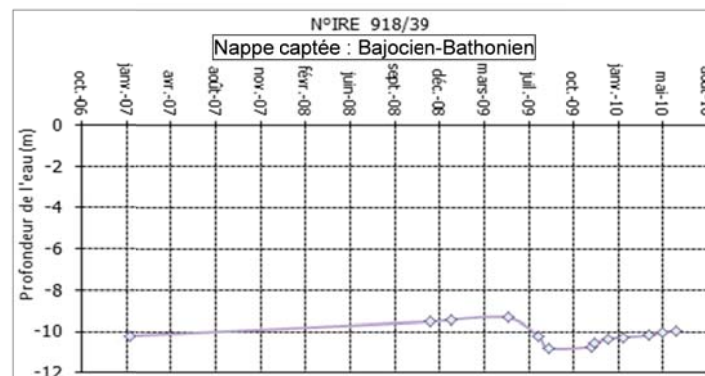


Figure 73 : Evolution piézométrique au niveau du piézomètre 918/39

Il ressort de ce suivi que le niveau de la nappe est globalement stable, au moins dans le secteur d'En-Nzala (Figure 73). Cependant une amorce de baisse de 1.46m est enregistrée depuis avril 2009 à novembre 2009, due essentiellement à la demande en eaux pour l'irrigation dans ce secteur (Pas de précipitation). A partir du novembre 2009, le niveau de la nappe a remonté de +0.78m sous l'effet des écoulements d'oued Ziz. Les amplitudes des baisses et des remontées sont donc faibles dans le Bajocien-Bathonien.

4.3 Caractérisation hydrodynamique des systèmes aquifères

4.3.1 Choix de la méthode d'interprétation

Suite aux résultats des chapitres précédents où les différentes unités hydrogéologiques ont été délimitées et caractérisées, il devient nécessaire de définir leur comportement hydrodynamique par exploitation des données des essais de pompage. Ces derniers ont pour but de déterminer les caractéristiques hydrauliques des ouvrages, les débits de production et d'évaluer les paramètres hydrodynamiques des réservoirs aquifères. La validité de leur interprétation dépendra du choix de la méthode qui devra répondre aux conditions hydrogéologiques locales.

L'analyse des faciès aquifères et les coupes lithologiques des forages de la zone ont montré que les réservoirs aquifères sont essentiellement calcaires ou marno-calcaires, souvent fissurés et fracturés.

Dans les roches fissurées, le mode d'écoulement en régime dynamique (en pompage) est plus complexe que dans les milieux poreux. Plusieurs auteurs (Gringarten A & Flopetrol B, 1982) ont travaillé sur des méthodes pour l'évaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fissurés, mais les solutions mathématiques d'interprétation proposées ne sont pas entièrement satisfaisantes. En milieux fissurés, l'écoulement est souvent aléatoire, il suit la forme des fentes et les fractures qui sont souvent ni planes, ni continues et les lois de perte de charge dépendent de leur configuration et du régime d'écoulement ; Dans ce cas, les vitesses d'écoulement peuvent être trop importantes, ce qui reste en dehors des limites de validité de la loi de Darcy. Au contraire, en milieu poreux, on admettrait que l'écoulement est laminaire, ce qui a été confirmée dans la plupart des cas par des mesures expérimentales (Castany G, 1998).

Ainsi, les données disponibles sont sous forme de :

- Fiches de débits d'essai et leurs rabattements finaux correspondants, habituellement obtenus par les foreurs, lors de l'évaluation du potentiel hydrique d'un puits privé ou publique à la suite de son installation,
- Mesures des rabattements ou des remontées sur des puits de pompage en absence de piézomètres d'observation.

Avec ces conditions, seule la méthode de Cooper & Jacob (1947) peut répondre à l'interprétation de ces essais. Néanmoins, elle permet d'obtenir seulement la transmissivité, celle-ci est obtenue par

l'interprétation des graphiques semi-logarithmiques donnant le rabattement (s) en fonction du temps (t), selon la formule suivante :

$$T = \frac{2.3Q}{2\pi\Delta s}$$

Où, T : transmissivité en m²/s, Q : débit en m³/s et s : rabattement en m

Quand on dispose uniquement du débit d'essai et de son rabattement final, la transmissivité peut être rapprochée par la formule de Dupuit (Dupuit, 1863) :

$$T = \frac{0.366 \times Q}{s} \times \text{Log} \frac{R}{r}$$

Où, Q = Débit ; R = Rayon d'action & r = rayon du puits et s = rabattement

4.3.2 Estimation de la transmissivité à partir des débits spécifiques

Dix-neuf (19) essais ont été rassemblés sous forme du débit d'essai et de son rabattement final correspondant, dont les caractéristiques ont présentées en annexe 6. Ces données proviennent de plusieurs sources (Associations, Communes, ONEE-Branche eau, DRH) et fournies par l'ABHGZR (annexe 6). Généralement ces mesures sont plus abondantes dans les archives que les valeurs des transmissivités ou de perméabilités. Il s'agit des méthodes simples et moins chères, souvent préférées pour caractériser les puits de pompage.

À noter que la validité de ces mesures est difficile à estimer ; Pour la plupart des mesures, le débit spécifique semble avoir été fait dès la mise en service des forages sans développement préalable. Ainsi, les données lithologiques sont souvent imprécises en terme de stratigraphie, ce qui nous a permis de sélectionner les points implantés directement ou un peu proche des aires d'affleurement des systèmes aquifères et cela pour éviter toute erreur d'interprétation.

En effet, avec une valeur moyenne du rayon du puits de 0.3 m et une valeur du rayon d'action de 500 m, les débits spécifiques obtenus qui sont du même ordre de grandeur que la transmissivité sont présentés sur la Figure 74 et la Figure 75.

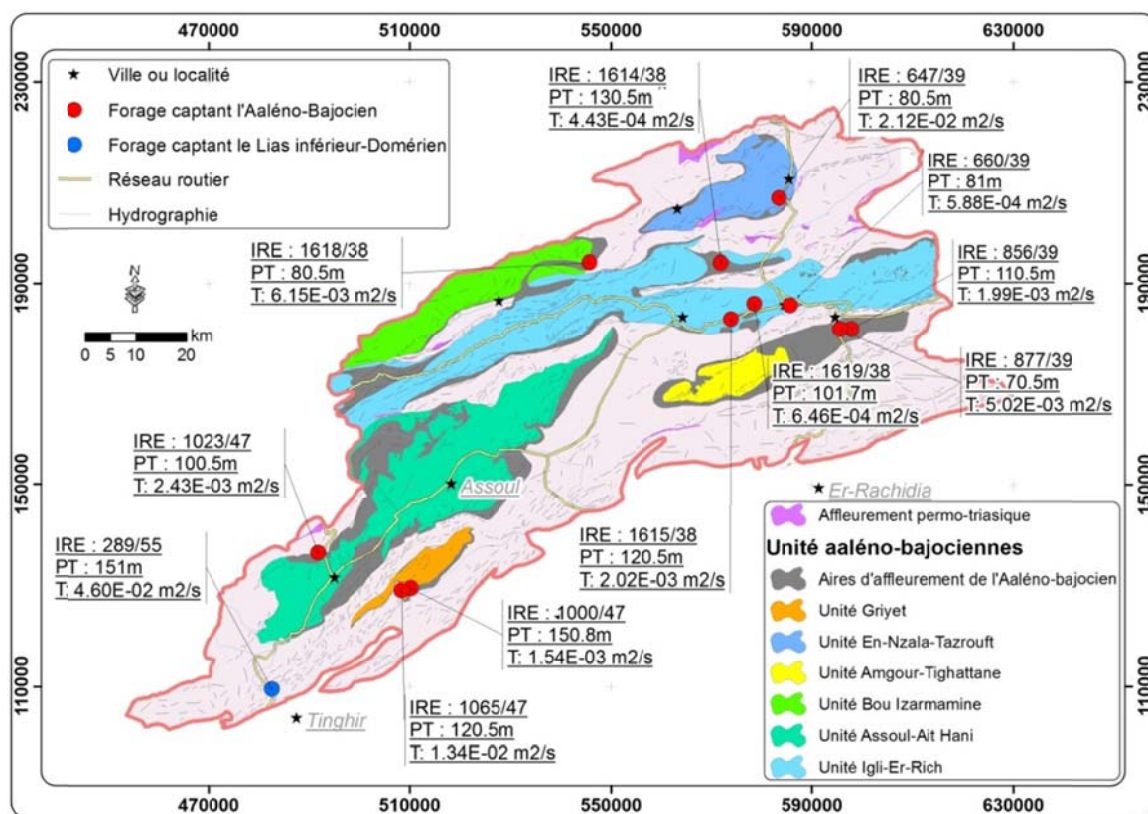


Figure 74 : Transmissivités des nappes Aaléno-Bajociennes et du Lias inférieur-Domérien, obtenues par la formule du Dupuits

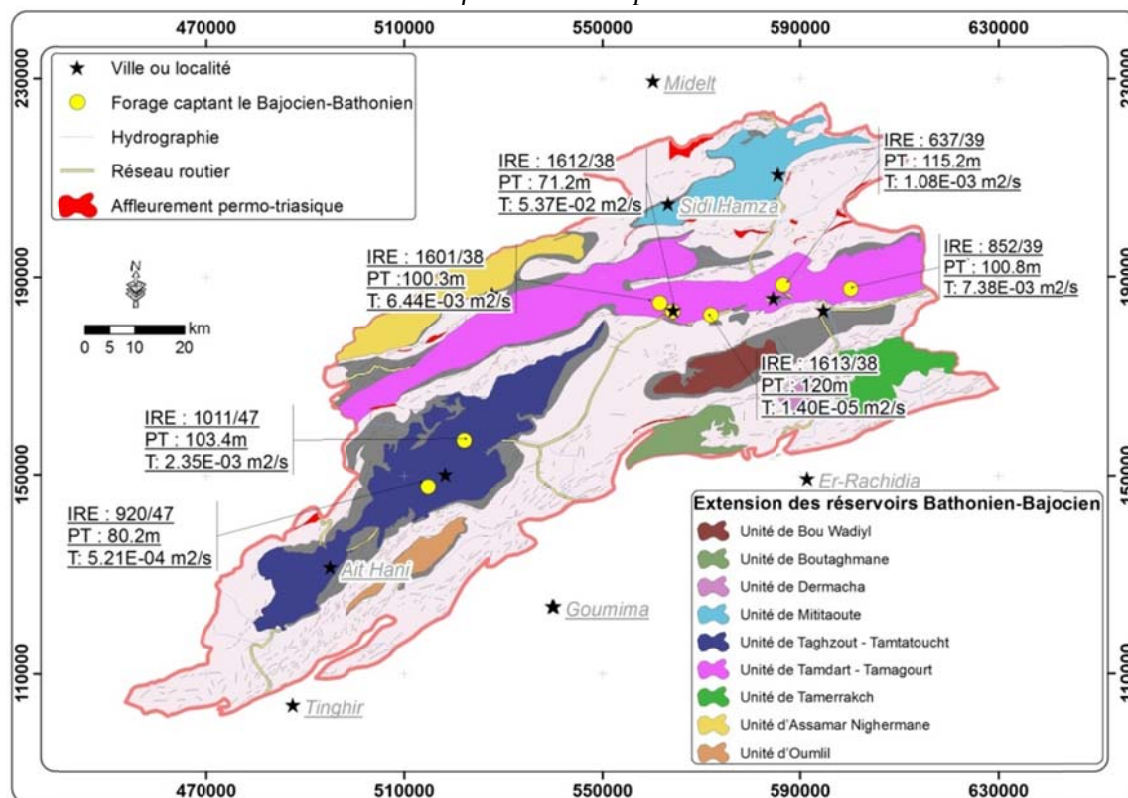


Figure 75 : Transmissivités des nappes du Bajocien-Bathonien obtenues par la formule du Dupuits

Sur les 19 points d'essais sélectionnés, un seul point représente le Lias inférieur-Domérien, 11 points représentent les aquifères de l'Aalénien-Bajocien et 7 représentent les aquifères du Bajocien-Bathonien.

D'après les résultats obtenus, il apparaît que la nappe du Lias inférieur possède une transmissivité très forte ($5,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$), assez cohérente avec les hypothèses émises dans la synthèse géologique et de la fracturation (calcaires et dolomies très fracturées).

Concernant les nappes de l'Aalénien-Bajocien, les transmissivités obtenues sont variables selon l'unité hydrogéologique captée et selon la position du point d'essai (entre $6,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et $1,34 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$), il semble dans ce cas, que la transmissivité est essentiellement conditionnée par la perméabilité des premiers mètres de terrain saturé et la densité de la fracturation dans les terrains captés.

Pour les nappes du Bajocien-Bathonien, les transmissivités obtenues sont aussi variables selon l'unité hydrogéologique captée et sont généralement plus faibles que les autres unités sous-jacentes du Lias inférieur-Domérien et de l'Aaléno-Bajocien (de $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ à $5,37 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$). Dans ce cas, les débits fournis par les ouvrages d'essais sont généralement limités (de quelques litres par seconde) en raison à la fois, de la position haute des parties productives et de l'abondance des marnes dans les niveaux captés.

4.3.3 Estimation de la transmissivité à partir des données des essais de pompage

Les données utilisées pour estimer la transmissivité proviennent aussi des associations, des communes, de l'ONEE-Branche eau et de l'ABHGZR. Ces données sont constituées de fiches techniques des forages et des mesures du rabattement en fonction du temps.

Dans le cadre de cette thèse, un total de 6 fiches techniques relativement complètes ont été retenues en fonction de la qualité des données qu'elles renferment.

Après développement et essais par paliers de débits qui sont souvent au nombre de 3. Les pompages de longues durées sont exécutés pour des durées comprises entre 3 et 72 heures et les remontées sont suivies pendant des durées comprises entre 1 et 4 heures (Tableau 20). Les mesures des rabattements ont été effectuées directement dans les puits de pompage en l'absence de piézomètres d'observation. Le Tableau 20 résume les caractéristiques des forages et des essais de pompages disponibles. La localisation des forages d'essai du complexe Aalénien-Bajocien et du complexe Bajocien-Bathonien est présentée respectivement dans la Figure 76 et la Figure 77.

Tableau 20. Caractéristiques des essais de pompages disponibles

IRE	Système aquifère	Unité hydrogéologique	Type d'essai	PT (m)	Débit d'essai (l/s)	Durée d'essai (h)
980/47	Aaléno-Bajocien	Igli – Rich	Descente Remontée	75	4 -	3 1.5
990/47	Aaléno-Bajocien	Igli – Rich	Descente Remontée	120	4 -	7 1.5
991/47	Aaléno-Bajocien	Igli – Rich	Descente Remontée	90	8 -	5 1
943/47	Bajocien-Bathonien	Taghzout - Tamtatoucht	P 1 descente P 2 descente	106	62 17	12 72
856/47	Bajocien-Bathonien	d'Oumlil	P 1 descente P2 descente	150	4 22	12 8
1011/47	Bajocien-Bathonien	Taghzout - Tamtatoucht	Descente Remontée	103	12 -	24 4

P : palier de débit ; *PT* : profondeur totale ; *IRE* : indice des ressources en eaux

Il ressort de ce tableau que les forages d'essais retenus sont peu nombreux et ne sont pas entièrement représentatifs, ils ont une pénétration partielle dans les systèmes aquifères sollicités. Les profondeurs totales sont comprises entre 75 et 150 m.

D'après les mesures disponibles, les données des rabattements et des remontées sont reportées sur des graphiques, où le temps (*t*) est en abscisses logarithmiques (en secondes) et le rabattement (*s*) ou le rabattement résiduel *sr* (remontée) sont en ordonnées linéaires (en mètres). La transmissivité (*T*) est calculée par l'approximation logarithmique de Jacob :

$$T = 0.183 \times \frac{Q}{C}$$

où *Q* représente le débit de pompage (en m³.h⁻¹) et *c* la pente de la droite représentative (en mètre). En absence de piézomètres d'observation autour des ouvrages de pompage, il n'est pas possible de calculer le coefficient d'emménagement.

Les courbes représentatives résultantes des forages d'essais du complexe Aaléno-Bajocien et du complexe Batonien-Bajocien sont représentées respectivement sur la Figure 76 et la Figure 77.

4.3.3.1 Complexes aquifères de l'Aaléno-Bajocien

a. Forage IRE 980/47 :

Ce forage est implanté directement sur les calcaires de l'Aaléno-Bajocien, il ne capte que partiellement l'unité Igli – Rich (Figure 76), qui se comporte comme une nappe libre. Les limites

latérales de cet aquifère se situent à plus de 2km de distance.

Lors de l'exécution de ce forage, un pompage d'essai a été effectué avec des observations de la descente et de la remontée ; Lors de la descente (Figure 76-a), un régime transitoire de très courte durée (330s) a été observé. Ce régime turbulent est donc en dehors des limites de validité de la loi de Darcy et il a provoqué un rabattement de 5.5m qui est dû à l'effet de capacité de l'ouvrage ou effet de puits. Une deuxième partie de la courbe, moins inclinée que la précédente est observée depuis $t = 330$ s jusqu'à la fin de l'essai (10800s) ; L'aquifère a tendance à se comporter comme un milieu infini, jusqu'à une pseudo-stabilisation des rabattements ; c'est la droite représentative de l'expression de Jacob, qui a permis de calculer la transmissivité ($T=4.88 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$). Cette stabilisation rapide peut être expliquée par l'obtention du régime permanent lié à une limite perméable.

Sur le graphique des rabattements résiduels (Figure 76-b), la remontée observée est plus régulière et plus rapide, ce qui permettra de distinguer que le débit que peut fournir la nappe est supérieur à celui choisi pour l'essai (supérieur à 4 l/s). La transmissivité obtenue est légèrement inférieure $T=7.32 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ (Figure 76).

b. Forage IRE 990/47 :

Ce forage de 120m de profondeur a les mêmes conditions hydrogéologiques du forage IRE980/47 (Figure 76). Les limites latérales de l'unité Igli – Rich se situent à environ 4km de distance. Le pompage d'essai a été effectué avec observations de la descente et de la remontée.

Au départ, lors de la descente (Figure 76-a), l'effet de capacité du puits est observé avec un rabattement très fort (17m) pendant une durée très courte (3 minutes). Le faible débit d'essai (4l/s) et les forts rabattements obtenus indiquent une faible capacité de l'aquifère à renouveler ses eaux pendant le pompage. Ensuite, les points s'alignent suivant une droite avec une pente plus faible (1.7m), il s'agit de la droite représentative de l'expression de Jacob, qui a permis de calculer la transmissivité de descente ($T=7.31 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$).

Avec ce faible débit d'essai, deux hypothèses sont possibles, soit les calcaires Aaléno-Bajociens ne sont pas assez fracturés, soit le puits n'est pas bien développé ou bien n'est pas bien équipé.

Les rabattements résiduels ont été faits de manière similaire que la descente : la courbe de la remontée (Figure 76-b') à une allure similaire que celle de la descente. La transmissivité obtenue est également similaire ($T=3.66 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$), elle donne une valeur représentative du terrain testé. Il

apparaît donc que ce forage n'est pas en mesure de fournir des débits élevés économiquement intéressants. Il s'agit d'une zone à minces fissures et assez éloignées de la zone d'alimentation (Figure 76).

c. Forage IRE 991/47 :

Ce forage de 90m de profondeur a les mêmes conditions hydrogéologiques des deux forages précédents. Les limites latérales se situent à plus de 2 km de distance (Figure 76).

Les données des rabattements en fonction du temps, ont permis d'établir le graphique de la descente (Figure 76-c), ce dernier montre une stabilisation au cours des premiers 13 minutes du pompage. Ensuite, les rabattements subissent un accroissement qui persiste jusqu'à la fin de l'essai pour s'aligner selon une seconde droite ayant une pente plus forte ($c=2.4m$).

Cet essai est différent aux autres essais précédents, lesquels présentent une droite représentative à pente relativement constante. Ce graphique dessinant une ligne brisée avec doublement de pente, suggère l'hypothèse d'un aquifère à limite latérale étanche. Ce résultat est conforme avec la géologie du secteur où les formations hydrogéologiques perméables sont affectées par des failles avec probablement des compartiments effondrés pouvant constituer des limites étanches (aquifère à limite latérale étanche). La transmissivité obtenue selon l'approximation logarithmique de C.E. Jacob est de $T=6.65 \cdot 10^{-4} m^2/s$ (Figure 76-c).

Le graphique de la remontée après l'arrêt du pompage (Figure 76-c'), est relativement similaire avec le premier segment de la descente, La transmissivité obtenue est légèrement supérieur $1.8 \cdot 10^{-3} m^2/s$.

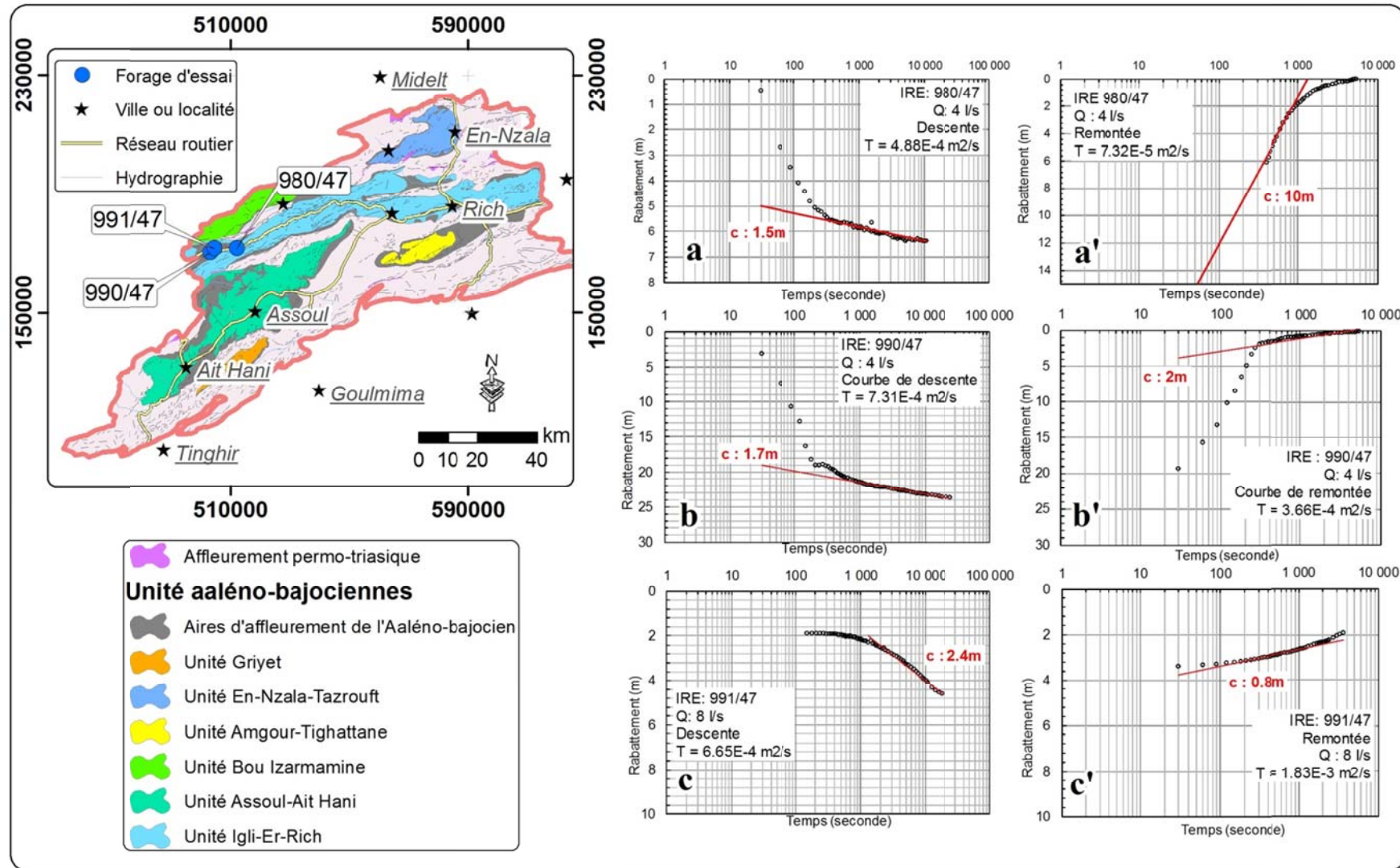


Figure 76 : Courbes représentatives des forages d'essais du complexe Aaléno-Bajocien

4.3.3.2 Complexes aquifères du Bajocien-Bathonien

a. Forage IRE 943/47 :

Ce forage capte 150m d'une alternance marno-calcaire, il ne traverse que partiellement l'unité Taghzout - Tamtatoucht du complexe Bajocien-Bathonien (Figure 77), qui se comporte ici comme une nappe multicouche.

Au contraire des autres essais précédents, le pompage d'essai de ce forage a été réalisé en deux paliers de débits décroissants. Au cours du premier palier (Figure 77-a), le débit de 62 l/s a provoqué un très fort rabattement, de 30m pendant les 7 premières minutes. Ensuite, les rabattements continuent leurs accroissement mais avec une pente légèrement faible et qui persistent jusqu'à la minute 65. Cette deuxième courbe plus ou moins stable et moins inclinée que la précédente a permis de tracer la première droite représentative et de calculer la transmissivité selon l'expression de Jacob ($T1=1.89 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$).

Il ressort de cette première courbe représentative que le débit choisi pour l'essai n'est pas conforme aux caractéristiques hydrogéologiques de la nappe, c'est pour cette raison, le foreur a baissé le débit (17l/s) pour avoir plus de stabilisation dans le rabattement (Figure 77-a). Cette réduction du débit a permis une remontée du niveau de 2m environ, puis une stabilisation jusqu'à l'heure neuf (9). Cette stabilisation correspondrait au phénomène de drainance, qui peut être interprété, à tort, comme l'obtention d'un régime permanent lié à une limite perméable, c'est la droite représentative de l'expression de Jacob, qui permet de calculer la transmissivité ($T2 = 3.46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$). Cette transmissivité calculée qui est un peu élevée, donne une valeur représentative du terrain de ce secteur. Il s'agit d'une nappe multicouche saturée probablement sur plusieurs niveaux calcaires en communication probable entre eux par drainance. Du point de vue pratique, il apparaît que ce forage n'est pas en mesure de fournir un débit de 62l/s ni 17l/s, un débit intermédiaire est éventuellement cohérent avec le résultat de l'essai (Figure 77-a).

Le graphique de la remontée après l'arrêt du pompage (Figure 77-a'), est plus régulier que celui de la descente, la nappe revient rapidement à son niveau initial après l'arrêt du pompage, La transmissivité obtenue est supérieur $7.56 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, il confirme la productivité importante obtenue lors de l'essai de la descente.

b. Forage IRE 856/39 :

Ce forage capte aussi l'unité de Taghzout - Tamtatoucht du complexe Bajocien-Bathonien (Figure 77) qui se comporte dans cet endroit, comme une nappe multicouche. Pour déterminer la transmissivité de l'aquifère au droit de ce forage, on ne dispose que de deux paliers enchainés à débits ascendants, respectivement de 4l/s et de 22l/s (Figure 77-b et b'). Les valeurs ainsi obtenues ne sont donc qu'approximatives.

Au cours du premier palier à débit égal à 4l/s, la courbe de descente (Figure 77-b) est relativement constante ($c=1.7\text{m}$) et le rabattement maximal obtenu est de 3.4m. L'aquifère se comporte dans cet endroit comme un milieu infini (pas de changement de pente de la droite représentative). Au cours du deuxième palier de $Q=22\text{l/s}$ (Figure 77-b'), la première courbe observée traduit l'effet de capacité de l'ouvrage, en provoquant un écoulement turbulent non linéaire et un rabattement de 3m. Par la suite les points se stabilisent et s'alignent suivant une droite qui est la première droite représentative, en donnant une transmissivité T_1 de $6.37 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ (Figure 77-b'). Cette stabilité de rabattement est interrompue dans la minute 15 où un nouveau régime turbulent est observé en donnant naissance à un rabattement de 1.62m pendant 9 minutes seulement. Au cours du développement du cône de rabattement du forage, une limite étanche est probablement rencontrée où il a provoqué une augmentation des rabattements, puis un nouveau régime d'équilibre, en donnant naissance à une stabilisation des rabattements avec une pente plus faible. La nouvelle transmissivité calculée est de $3.66 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ (Figure 77-b').

c. Forage IRE 1011/47 :

Ce forage capte des calcaires et des calcaires marneux de l'unité de Taghzout - Tamtatoucht du complexe Bajocien-Bathonien, qui se comporte dans cet endroit comme une nappe captive.

Le graphique de la descente désigne une ligne brisée avec un doublement de pente (Figure 77-c), suggère l'hypothèse d'un aquifère illimité latéralement. Au début du pompage, l'effet de capacité du puits n'est pas ressenti, les points s'alignent directement suivant une droite, de pente $c_1=6\text{m}$. Cet alignement persiste jusqu'à environ une heure. Ici l'aquifère a tendance à se comporter comme un milieu à limite étanche.

Au cours de l'évolution du cône du rabattement, la droite représentative a changé sa pente (1m au lieu de 1.6m) en donnant naissance à une deuxième droite subhorizontale, ce que suggère l'hypothèse d'un apport en eau supplémentaire qui provient, en l'absence d'un cours d'eau proche, des calcaires

sous-jacents. Cette hypothèse est justifiée par la géologie locale ; En effet, on note la présence d'un niveau calcaire puissant de plus de 73m (Figure 77-c).

Au contraire, le graphique de la remontée (Figure 77-c') montre une seule droite représentative avec une pente similaire à celle de la deuxième droite de descente, mais dans un temps plus long. Lors de la remontée, les points se stabilisent dans un niveau inférieur à celui avant pompage, avec une différence de 10m. Ce qui permettra de supposer que les niveaux captés sont limités spatialement et que la réserve est aussi limitée par la présence de failles ou des panneaux effondrés.

Les transmissivités obtenues lors de la descente et de la remontée sont similaires et sont respectivement de $2.2 \text{ E-}4\text{m}^3/\text{s}$ et $2.0\text{E-}4\text{m}^3/\text{s}$ (Figure 77-c et c').

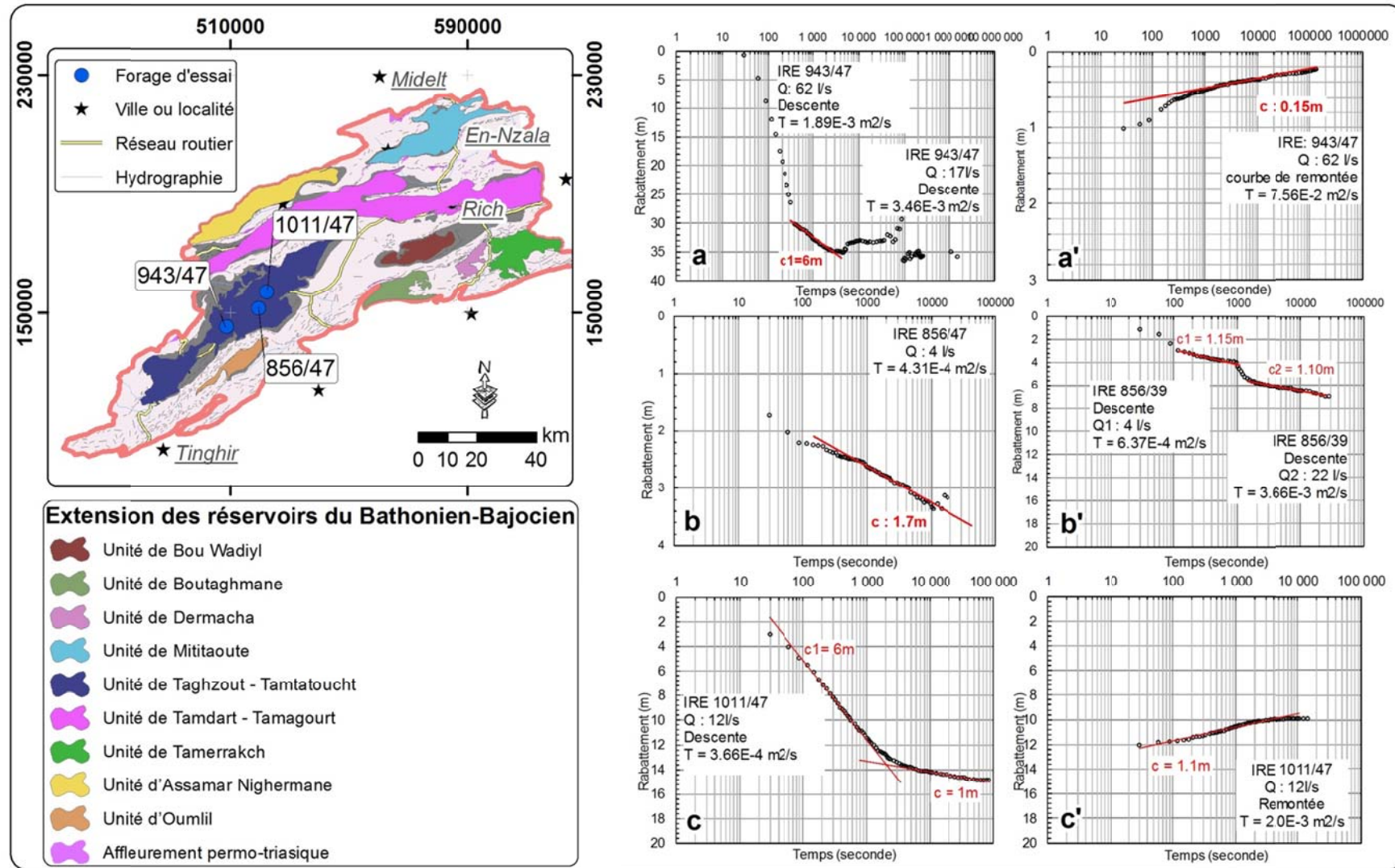


Figure 77 : Courbes représentatives des forages d'essais du complexe Bajocien-Bathonien

4.4 Evaluation des bilans des nappes

4.4.1 Système aquifère du Lias inférieur – Domérien

Le cadre géologique montre que Lias inférieur - Domérien est relativement continu et bien conservé notamment, le long des crêtes anticlinales fracturées, d'orientation générale SO-NE. Ce système repose sur un substratum Permo-Triasique qui constitue un radier imperméable général et continu, parfois rencontré en affleurement dans les grands axes anticlinaux. Les précipitations constituent l'apport essentiel, en particulier l'enneigement qui intéresse surtout les affleurements élevés du nord. Sauf quelques zones tabulaires, les pentes sont en général très fortes et ne permettent qu'une faible infiltration. Localement, des pertes d'oued et d'underflows peuvent alimenter le Lias (en amont des gorges). En quelques cas locaux, des abouchements par faille entre le Lias et le Dogger peuvent fournir un apport du Dogger au Lias. Les sources sont l'exutoire essentiel du système Lias inférieur – Domérien, il s'agit en général des sources d'émergence, se situant au point bas des gorges transversales des anticlinaux. Ces sources présentent parfois de gros débits mais sont variables. Elles ont aussi souvent un caractère de déversement ou de trop plein.

Les échanges latéraux pourraient exister entre le Haut Atlas et le bassin Crétacé d'Errachidia-Boudnib au sud, attestés par les connaissances géologiques et structurales (continuité avérée des formations jurassiques sous la partie septentrionale du bassin Crétacé d'Errachidia-Boudnib).

4.4.1.1 Entrée de la nappe

1) Infiltrations pluviales

Les infiltrations pluviales ont été évaluées sur la base des moyennes interannuelles des précipitations, enregistrées dans 9 stations, bien réparties dans la zone ; Dans la zone d'étude, les précipitations s'établissent dans une fourchette allant de 115 à 255 mm/an. Elles diminuent, en allant du nord vers le sud, en fonction de l'altitude et des reliefs rencontrés.

En tenant compte des incertitudes pour l'appréciation de l'infiltration, il semble raisonnable, dans une première approche, d'adopter un taux de recharge uniforme de 2.5% (ABHGZR, 2011) qui est appliqué à l'ensemble des affleurements du Lias-inf-Domérien. La carte des infiltrations pluviales résultante est présentée sur la Figure 78.

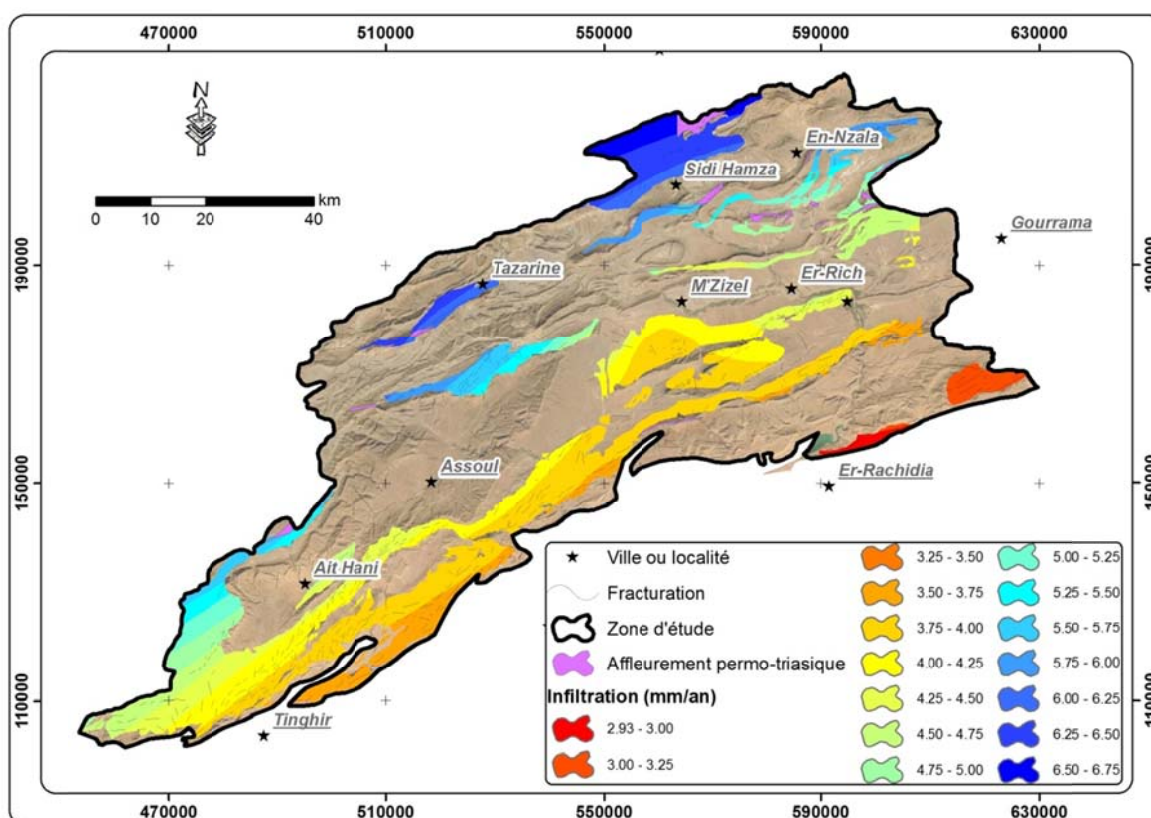


Figure 78 : Distribution spatiale de la lame d'eau infiltrée sur les aires d'affleurement du Lias inférieur-Domérien – Hauts bassins de Ziz et Rérís

D'après cette figure, les infiltrations pluviales varient dans l'espace, généralement elles augmentent dans les zones de fortes altitudes et dans le versant nord du Haut Atlas (moins arrosé).

En prenant une aire d'affleurement de 2360 km², calculé par SIG et une lame d'eau infiltrée de 2.93mm à 6.75 mm (Figure 78), l'apport total, calculé par moyenne pondérée est d'environ 10.73 Mm³.

2) Recharge par infiltration dans les lits des oueds

Dans les aires d'affleurement du Lias inférieur –Domérien, des échanges hydrauliques sont possibles au niveau des lits des cours d'eau qui les traversent. Selon la synthèse piézométrique, la nappe dans les aires d'affleurement du Lias inférieur – Domérien se trouve à des profondeurs comprises entre 5 et 39m, ce qui permet à un drainage vertical descendant. Selon De Marsily (1981), les calcaires et dolomies fissurées similaires à ceux du Lias inférieur – Domérien ont une vitesse d'infiltration moyenne de 10⁻⁵ m/s. En multipliant cette vitesse par l'aire de contact calculé par SIG (4.5km²), un apport global de 14.19 Mm³ est obtenu.

3) *Flux entrant des zones externes nord*

En se basant sur la carte piézométrique du réservoir Lias inférieur-Domérien (Figure 60), il apparaît que le réservoir du Lias inférieur - Domérien s'alimente à partir des zones nord. Cet éventuel échange hydraulique est justifié aussi par la synthèse géologique où les formations liasiques se trouvent étendues notamment vers le NE et le SO.

En appliquant la loi de Darcy pour un front de nappe de 40 km (zone NE) et 70km (zone SO), un gradient hydraulique moyen de 1.25% et une transmissivité moyenne de 10^{-3} m²/s (De Marsily G, 1981), un flux entrant d'environ 50.46 Mm³ est obtenu.

4) *Drainance*

Il a été signalé auparavant que le Lias inférieur - Domérien est fortement découpé par la tectonique, et dont les sources sont souvent à débits importants et constituaient leurs principaux exutoires. Ces débits proviennent sans aucun doute de l'importante épaisseur des calcaires et des dolomies Liasiques, fortement fracturés et transmissives. L'importance de cet aquifère provienne également de sa nature captive, au-dessous d'un recouvrement marno-calcaire du Dogger et du Toarcien-Aalénien.

Dans ce paragraphe, la drainance estimée par la loi de Darcy est basée sur le débit de la source des gorges (de 98 à 3380l/s selon les années, 788l/s en moyenne). Ce fort débit ne peut s'expliquer par l'infiltration directe des pluies sur les seuls affleurements liasiques proches, qui ne couvrent qu'une soixantaine de km². Il faut bien qu'il y ait un apport supplémentaire, et nous émettons l'hypothèse, fort vraisemblable, que cet apport supplémentaire est celui de la drainance. L'ordre de grandeur de cet apport par drainance est loin d'être négligeable, et l'on peut tenter de l'estimer par la loi de Darcy. La superficie à l'amont de l'isopièze 1580m (Figure 60, Figure 63), qui limite au nord la drainance descendante est d'environ 580km², et il faut pour expliquer les 788l/s, que cette drainance représente un débit de l'ordre de 1,36l/s par km².

Il suffit pour cela que la perméabilité verticale « Kv » du Dogger et du Toarcien-Aalénien atteigne une valeur de 10^{-10} m/s. Une telle valeur est parfaitement compatible avec les faciès marno-calcaires puissants qui constituent ce recouvrement. En multipliant cette transmissivité par les aires de recouvrements hors secteurs d'artésianisme jaillissants (environ 4500 km²), un apport global de drainage descendant de l'ordre de 14,20 Mm³ est obtenu.

4.4.1.2 Sortie de la nappe

1) Les sources

Les sources constituent un exutoire principal du système Lias inférieur – Domérien. Les principales sources inventoriées dans la zone sont indiquées dans le Tableau 21. Leur débit moyen total a été évalué à près de 2370 l/s, soit un apport global 74.74 Mm³/an.

Tableau 21. Sources captant le Lias inférieur – Domérien dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris

Bassin	Source	CE (μs/cm)	Qm.a (l/s)
Haut Rhéris	S. Tahamdount	463	179
	S. Illoussa	584	3.95
	S. des gorges	544	788
	S. Agolzi Tassfaloute	500	134.38
	S. Aghbalou Tassamite	644	9.3
Haut Ziz	S. Aghbalou Larbaa	485	5
	S. Hamat Moulay Hachem	484	18
	S. Tifikra	891	33.75
	S. Zaouit Sidi Hamza	858	1199
Q. total			2370

CE : Conductivité électrique ; Qm.a : Débit moyen interannuel ;

L'analyse spatiale de ces données montre que les débits sont variables d'une source à l'autre, le maximum est enregistré dans le haut Ziz avec un débit de 1199l/s (sources de Zaouit Sidi Hamza), le minimum est enregistré dans le Haut Rhéris avec un débit de 3.95 l/s (source d'Illoussa). Généralement les apports des sources drainant le Lias inférieur-Domérien représentent 70% du débit fournis par les sources dans l'ensemble de la zone d'étude (Paragraphe 3.3.4).

2) Flux sortant vers le bassin d'Errachidia – Boudnib au sud

En se basant sur la même carte piézométrique générée (Figure 60), il apparaît que la nappe se décharge vers le bassin d'Errachidia-Boudnib au sud. D'après l'analyse géologique et structurale, les secteurs préférentiels au drainage souterraine sont ceux situés au NE d'Errachidia, au SO de l'Lahroune et au nord de Tinghir. Le flux sortant est estimé à environ 18.92 Mm³ en se basant sur la loi de Darcy, avec un front de nappe total de 120 km, un gradient hydraulique moyen de 0.5% et une transmissivité moyenne de 10⁻³ m²/s.

4.4.1.3 Bilan global du Lias inférieur-Domérien

Le bilan global est présenté sur le Tableau 22:

Tableau 22. Bilan global du système Lias inférieur – Domérien

Entrées (Mm ³)	Drainance descendant	14.20
	Infiltration pluviales	10.73
	Infiltration dans le lit des oueds	14.19
	Flux entrant	50.46
	Total	89.57
Sorties (Mm ³)	Sources	74.74
	Flux sortant	18.92
	Total	92.62
BILAN		-3.04

Le bilan obtenu montre que l'essentiel de la recharge du Lias inférieur-Domérien s'effectue par les flux entrants des zones nord, soit 56% des entrées, le reste est partagé entre le drainage descendant des nappes sus-jacentes de l'Aaléno-Bajocien (16%), les infiltrations pluviales (12%) et l'infiltration dans les lits des oueds au droit des aires d'affleurement (14%).

Quant aux sorties de la nappe, les sources représentent l'élément essentiel de la décharge avec environ un apport de 75 Mm³, soit 80% des sorties de la nappe, suivi par les flux sortants vers la nappe Crétacé d'Errachidia (18.92 Mm³) selon 3 principaux axes de drainage (Figure 22).

Globalement le bilan obtenu montre que la nappe est très peu sollicitée, sous un régime naturel d'alimentation et de décharge (bilan relativement équilibré).

4.4.2 Système aquifère de l'Aaléno-Bajocien

Comme discuté précédemment, l'Aalénien-Bajocien est sous forme d'unités séparées, sous forme de cuvettes synclinales, généralement sans ou à faibles communications entre elles. Il s'agit des bassins effondrés en blocs basculés. Les communications transversales entre eux ne sont possibles qu'à la faveur de certains relais d'anticlinaux. Au-dessous, l'Aalénien-Bajocien est séparé par le niveau imperméable et puissant du Toarcien-Aalénien inférieur, qui joue, le rôle du premier plan imperméable du Haut Atlas calcaire.

Les précipitations constituent l'apport essentiel de ces unités qui intéressent surtout les affleurements, d'étendus relativement réduits. Les sources constituent l'exutoire essentiel de ces unités, il s'agit en général des sources de trop plein et de déversement. Les communications entre les unités de l'Aalénien-Bajocien et le Lias inférieur – Domérien sous-jacent sont possibles par drainage et en raison de la présence de certaines failles.

4.4.2.1 Entrée des nappes

1) Infiltration pluviales

Ce paramètre est quantifié sur la base de la carte des isohyètes générées et un taux de recharge uniforme de 5% (ABHGZR, 2011), relativement supérieur à celui appliqué sur les affleurements du Lias inférieur – Domérien, et cela conformément aux faibles pentes des affleurements Aaléno-Bajociens. Pour chaque unité hydrogéologique identifiée, l'apport d'infiltration des eaux de pluies calculé est obtenu en multipliant l'aire d'affleurement de l'Aalénien-Bajocien et la lame d'eau infiltrée correspondante.

La Figure 79, représente la distribution spatiale de la lame d'eau infiltrée par aire d'affleurement. Les apports d'eau infiltrés calculés pour chaque unité sont représentés sur le Tableau 23, et sont en général faible conformément aux affleurements souvent réduits.

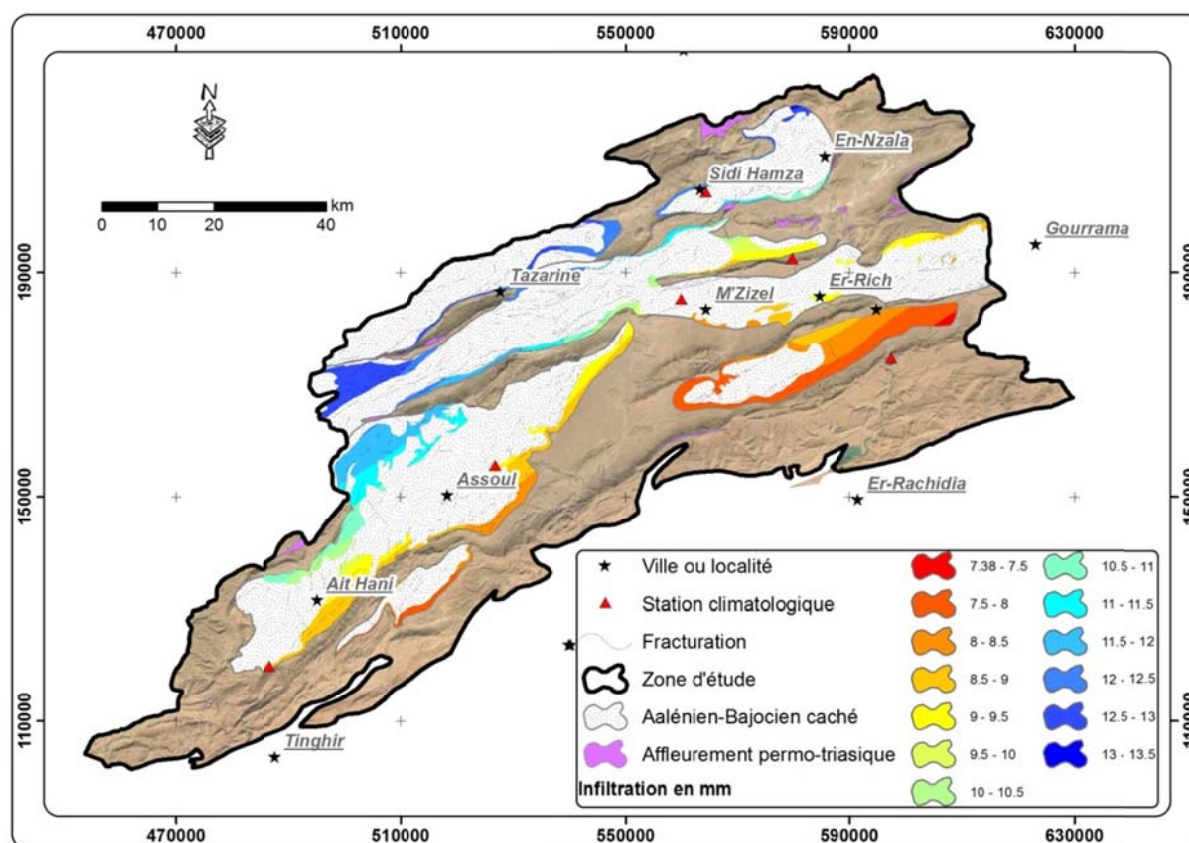


Figure 79 : Distribution spatiale des lames d'eaux infiltrées sur les systèmes aquifères Aaléno-Bajociens – Hauts bassins de Ziz et Rérís

D'après ce résultat, les infiltrations pluviales varient aussi dans l'espace (de 7.38mm à 135mm), généralement elles augmentent du sud vers le nord en fonction de l'altitude et la position des aires d'affleurement par rapport au versant nord du Haut Atlas (plus arrosé) et le versant sud (moins arrosé).

Tableau 23. Apport des eaux d'infiltration pluviales des unités Aaléno-Bajociennes – Hauts bassins de Ziz et Rhéris

Unité	Affleurement en km ²	Lame d'eau infiltrée en mm	Apport en Mm ³
En-Nzala - Tazrouft	30	12.2	0.37
Bou Izarmamuine	38	13	0.49
Igli – Rich	235	10.8	2.54
Amgour - Tighattane	211	8.2	1.73
Assoul – Ait Hani	357	10	3.57
Griyet	19	7.8	0.15
TOTAL			8.85

En prenant une aire d'affleurement de 890 km², calculé par SIG et une lame d'eau infiltrée de 7.38mm à 13.5mm (Figure 79), l'apport total, calculé par moyenne pondérée est d'environ 8.85 Mm³.

2) Recharge par infiltration dans le lit des oueds

Dans les aires d'affleurements de l'Aaléno-Bajocien, traversés par les cours d'eau permanents, des échanges hydrauliques sont possibles. Selon la synthèse de la piézométrie ci-dessus, les nappes au niveau des zones synclinales sont souvent artésiennes ; Ailleurs, le niveau est compris entre 5 et 61.9 m, ce qui permet à un drainage vertical descendant. Selon De Marsily, 1981, les calcaires plus ou moins fracturées se caractérisent par une vitesse d'infiltration moyenne de 10⁻⁶ m/s. En multipliant cette vitesse par les aires de contact, le long des lits des cours d'eau permanents, un apport global de 9.39 Mm³ est obtenu (Tableau 24).

Tableau 24. Apports des infiltrations dans les lits des cours d'eau dans les unités Aaléno-Bajociennes – Hauts bassins de Ziz et Rhéris)

Unité	Aires de Contact en km ²	K (m/s)	Apports en m ³ /s	Apport Mm ³
En-Nzala - Tazrouft	0.2	10 ⁻⁶	0.02	0.6
Bou Izarmamuine	0	10 ⁻⁶	0	0.0
Igli – Rich	0.75	10 ⁻⁶	0.075	2.4
Amgour - Tighattane	0	10 ⁻⁶	0	0.0
Assoul – Ait Hani	0.8	10 ⁻⁶	0.08	2.5
Griyet	0	10 ⁻⁶	0	0.0
TOTAL				5.5

En prenant une aire de contact des lits des cours d'eau avec les aires d'affleurement des unités Aaléno-Bajociennes (1.75 km^2) calculé par SIG et une perméabilité moyenne de 10^{-6} m/s des marno-calcaires, représentant ces unités (Tableau 24), l'apport total calculé est d'environ 5.5 Mm^3 .

4.4.2.2 Sortie des nappes

1) Les sources

Les sources constituent un exutoire principal de l'Aaléno-Bajocien. Les principales inventoriées dans la zone concernent seulement deux unités qui sont indiquées sur le Tableau 25. Leur débits moyens ont été évalués à près de $23411/\text{s}$, soit $7.61 \text{ Mm}^3/\text{an}$.

Tableau 25. Sources captant les réservoirs de l'Aaléno-Bajocien dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris

Unité	Source	Q (l/s)	Apport Mm^3
Bou Izarmamuine	S. Aghbalou N'tmachette	3.00	0.22
	S. Tageroute Anfergal	4.06	
Assoul – Ait Hani	S. Aghbalou Harouine	0.50	7.39
	S. Aghbalou Agorzi	1.25	
	S. Tamda	10.26	
	S. Tit N'Oulghem Tamajialet	35.60	
	S. Tit N'Oulghem	99.71	
	S. Ima Haggga Ali	87.00	

L'analyse spatiale de ces données montre que les débits sont variables d'une source à l'autre et d'une unité hydrogéologique à l'autre, le maximum est enregistré dans l'unité d'Assoul – Ait Hani (7.39 Mm^3) qui présente la majorité des sources inventoriées, le minimum est enregistré dans l'unité de Bou Izarmamuine avec un apport global de 0.22 (3%).

2) Pompages destinés à l'AEP

L'ONEP-Branche eau utilise depuis l'année 2000, deux ouvrages (674/39 et 1616/38) captant l'unité d'Igli-Rich de l'Aaléno-Bajocien pour l'AEP du centre Rich et ses localités environnantes. Le Tableau 26 représente l'historique des volumes pompés disponibles pour la période 2000-2008.

Tableau 26. Ouvrages ONEP et volumes d'eaux prélevées dans les nappes Aaléno-Bajociennes des hauts Ziz et Rhéris

Année	IRE 674/39 Volume prélevé (m ³)	IRE 1616/38 Volume prélevé (m ³)	Volume prélevé Global (m ³)
2000	502 995	0	502 995
2001	511 362	0	511 362
2002	504 505	0	504 505
2003	490 250	0	490 250
2004	513 548	0	513 548
2005	596 070	0	596 070
2006	582 231	0	582 231
2007	545 464	45 956	591 420
2008	204 333	380 299	584 632
Moyenne (m³)			541 890

Selon ces historiques, les prélèvements sont variables pour l'IRE 1616/38 et relativement constants pour l'IRE 674/39, l'apport moyen destiné à l'AEP est évalué à près de 0.54 Mm³.

3) Pompages destinés à l'irrigation

Vu, la profondeur relativement importante des nappes Aaléno-Bajociennes, les agriculteurs de la zone s'orientent, soit vers les eaux de surfaces, soit vers les eaux des nappes peu profondes du Bajocien-Bathonien ou du Quaternaire. L'apport des eaux pompées destinées à l'irrigation est donc négligeable.

4.4.2.3 Bilan global de l'Aalénien-Bajocien

Le bilan global est présenté sur le Tableau 27, il apparait qu'il est positif, vu la difficulté d'accès aux eaux des nappes Aaléno-Bajociennes (très profonde).

Tableau 27. Bilan global du système Aaléno-Bajocien des hauts Ziz et Rhéris

ENTREES Mm ³	Infiltration pluviales	8.85
	Infiltration dans le lit des oueds	5.5
	Total entrée	14.36
SORTIES Mm ³	Sources	7.61
	Pompages destinés à l'AEP	0.54
	Total sortie	8.15
BILAN		+ 6.21

Le bilan obtenu montre que l'essentiel de la recharge s'effectue par les infiltrations pluviales et dans le lit des oueds avec un apport global de 14.36Mm³, ce qui atteste que ces nappes sont relativement indépendantes.

Les sources participent fortement à la décharge des nappes Aaléno-Bajociennes avec un apport de 7.61 Mm³. Cependant les captages ONEP ne participent que par une faible fraction de 0.54 Mm³.

Globalement le bilan obtenu est positif et montre que les nappes Aaléno-Bajociennes sont faiblement sollicitées.

4.4.3 Système aquifère du Bajocien – Bathonien

Le Bajocien – Bathonien est découpé en 9 unités hydrogéologiques relativement indépendantes. Selon l'analyse des faciès, ce système est représenté par la deuxième barre calcaire à corniches de la formation de Tazigzaout, d'environ 100m de puissance. Selon l'analyse des coupes lithologiques disponibles, il s'agit des terrains marno-calcaires à dominance marneuses où se développent plusieurs nappes parfois superposés ou perchées. L'alimentation des unités hydrogéologiques se fait par infiltration des eaux de pluie, par infiltration dans les lits des cours d'eau et par retour des eaux d'irrigation. La décharge se fait soit par les sources, soit par pompages destinés à l'AEP ou à l'irrigation.

4.4.3.1 Entrée des nappes

1) *Infiltration pluviales*

Les faibles précipitations et les faibles perméabilités dans ces secteurs sont tous deux des facteurs défavorables à l'infiltration. Ces conditions particulières ne permettent pas la constitution de nappes d'eau souterraines importantes. Les infiltrations sont quantifiées sur la base de la répartition spatiale des précipitations et sur un taux de recharge uniforme de 2.5% (ABHGZR, 2011) qui est appliqué sur l'ensemble des aires d'affleurements du Bajocien-Bathonien, divisés en plusieurs zones homogènes. Le Tableau 28, résume l'apport d'eau infiltré calculé pour chaque unité aquifère.

Tableau 28. Apport des eaux d'infiltration dans les unités du Bajocien-Bathonien – hauts bassins de Ziz et Rhéris

Unité	Affleurement en km ²	Lame d'eau moy. infiltrée en mm	Apport en Mm ³
Unité de Mititaoute	314	6.20	1.95
Unité d'Assamar Nighermane	300	6.52	1.96
Unité de Tamdart - Tamagourt	1035	5.00	5.18
Unité de Taghzout - Tamtatoucht	840	4.60	3.86
Unité d'Oumlil	89	4.30	0.38
Unité de Bou Wadiyl	130	4.00	0.52
Unité de Boutaghmane	126	3.60	0.45
Unité de Dermacha	54	3.41	0.18
Unité de Tamerrakch	198	3.38	0.67
TOTAL			15.15

En prenant une aire d’affleurement de 3086 km², calculé par SIG et une lame d’eau infiltrée de 3.25mm à 6.75mm (Figure 80), l’apport total, calculé par moyenne pondérée est d’environ 15.15 Mm³, répartie inégalement dans les différentes unités aquifères.

Malgré le taux d’infiltration appliqué aux nappes Aaléno-Bajociennes (5%), les nappes du Bajocien-Bathonien reçoivent une lame d’infiltration plus importante en fonction de leurs aires d’affleurement qui sont 347% plus supérieur.

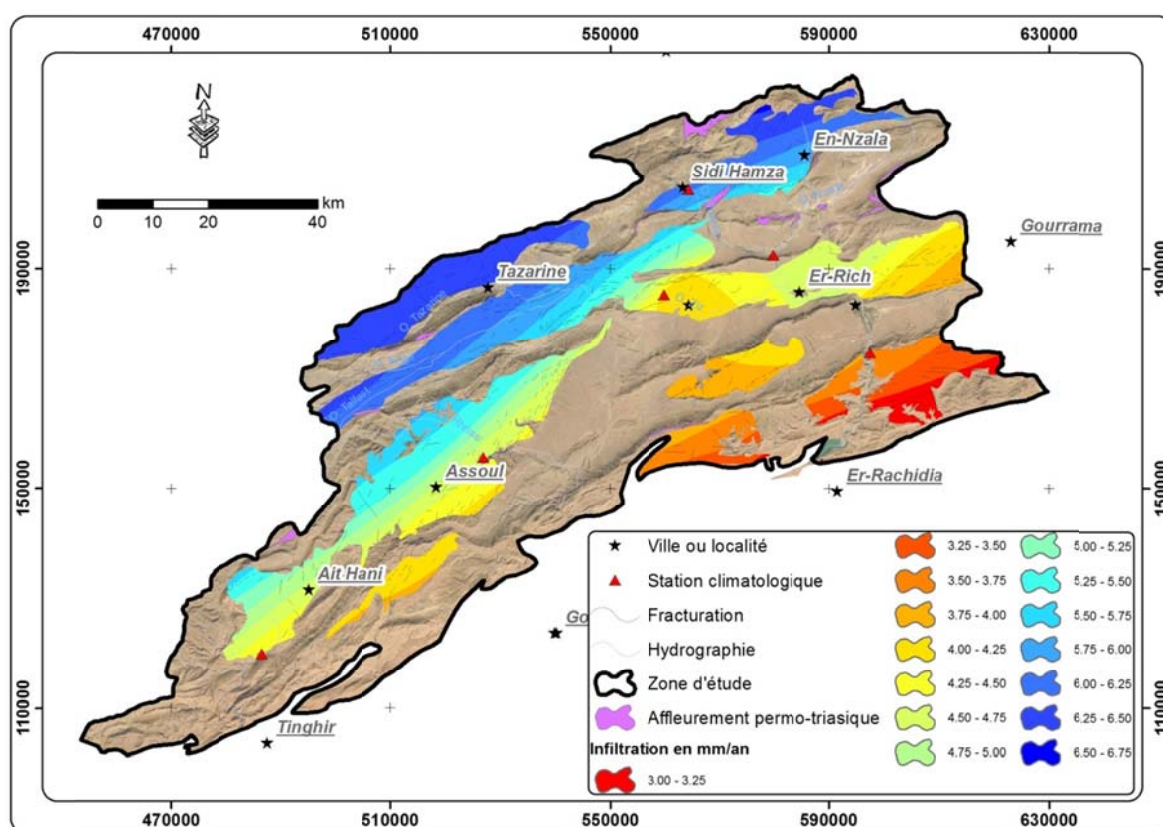


Figure 80 : Distribution spatiale de lames d’eaux infiltrées sur les unités aquifères du Bajocien-Bathonien

2) Recharge par infiltration dans les lits des cours d’eau

Dans les aires d’affleurement des unités du Bajocien–Bathonien, des échanges hydrauliques sont possibles le long des lits des cours d’eau entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Selon la synthèse de la piézométrie, la profondeur des nappes dans ces endroits varie entre 5 et 27 et peut aller au-delà de 60m, ce qui permet à un drainage vertical descendant. Selon De Marsily (1981), les marno-calcaires à dominance marneuse se caractérisent par une vitesse d’infiltration moyenne de 10⁻⁷ m/s. En multipliant cette vitesse par les aires de contact entre les unités du Bajocien-Bathonien et les

lits des cours d'eau permanent qui les traversent et en prenant en considération le débit moyen de chaque cours d'eau, un apport global de 12.61Mm³ est obtenu (Tableau 29).

Tableau 29. Apports des infiltrations dans les lits des cours d'eau (unités du Bajocien-Bathonien)

Unité	Aires de Contact en km ²	K (m/s)	Apports en m ³ /s	Apport Mm ³
Unité de Mititaoute	0.5	10 ⁻⁷	0.05	1.58
Unité d'Assamar Nighermane	0.0	10 ⁻⁷	0.00	0.00
Unité de Tamdart - Tamagourt	2.5	10 ⁻⁷	0.66	7.88
Unité de Taghzout - Tamtatoucht	1.0	10 ⁻⁷	0.10	3.15
Unité d'Oumlil	0.0	10 ⁻⁷	0.00	0.00
Unité de Bou Wadiyl	0.0	10 ⁻⁷	0.00	0.00
Unité de Boutaghmane	0.0	10 ⁻⁷	0.00	0.00
Unité de Dermacha	0.0	10 ⁻⁷	0.00	0.00
Unité de Tamerrakch	0.0	10 ⁻⁷	0.00	0.00
TOTAL				12.61

Malgré la vitesse d'infiltration moins importante dans les lits des cours d'eau traversant les aquifères du Bajocien-Bathonien, l'apport d'infiltration obtenu est plus important (12.61 Mm³). Il est le résultat conjugué des aires de contact et les apports des cours d'eau correspondant qui sont plus importants.

3) Retour d'eaux d'irrigation

Les eaux destinées à l'irrigation donnent lieu à un retour partiel d'eau qui alimentent les aquifères et constituent de ce fait un facteur de recharge des nappes sous-jacentes. Au niveau de l'aire d'étude, le volume d'eau pompé, destiné à l'irrigation est évalué à près de 6.53 Mm³ (Tableau 30). Le coefficient de retour considéré est de 20% en moyenne (ORMVAT, 2015), permettant d'avoir un retour global de 1.31 Mm³ (Tableau 30), partagé entre l'unité de Mititaoute (41%) et l'unité de Tamdart – Tamagourt (59%).

Tableau 30. Retours d'irrigation dans les unités hydrogéologiques du Bajocien-Bathonien – Hauts bassins de Ziz et Rhéris

Unité hydrogéologique	Volume d'eau prélevé (Mm ³)	Retours d'irrigation (Mm ³)
Unité de Mititaoute	2.70	0.54
Unité de Tamdart - Tamagourt	3.83	0.77
Total	6.53	1.31

L'apport calculé apparait relativement faible, il est le résultat conjugué de la réduction des périmètres irrigués dans la zone et l'orientation des agriculteurs vers les eaux de surface, notamment lors des périodes des crues.

4.4.3.2 Sorties des nappes

1) Les sources

Plusieurs sources captent les réservoirs du Bathonien-Bajocien. Les principales inventoriées dans la zone sont indiquées dans le Tableau 31. Leur débit moyen est estimé à près de 561.53 l/s, soit 7.61 Mm³/an.

Tableau 31. Sources captant les unités du Bajocien-Bathonien des hauts bassins de Ziz et Rhéris (ABHGZR, 2012)

Unité	Source	Qma (l/s)	Apport Mm ³
Assamar Nighermane	S. Aghbalou N'tmachette	3	0.09
	S. Tageoroute Anfergal	4.06	0.13
Tamdart - Tamagourt	S. Tabrijate	48.6	1.53
Taghzout - Tamtatoucht	S. Aghbalou Harouine	0.5	0.02
	S. Aghbalou Agorzi	1.25	0.04
	S. Lksba D'Lkayed Timaddite	5.02	0.16
	S. Aghbalou Assrir	6	0.19
	S. Ifri N'Wamane	9.06	0.29
	S. Tamda	10.26	0.32
	S. Tit N'Oulghem Tamajialet	35.6	1.12
	S. Aghbalou Bougzine ou Krouchet	89.87	2.83
	S. Ima Hagga Ali	348.31	10.98
TOTAL		561.53	17.71

CE : Conductivité électrique ; Qma : Débit moyen annuel

A part la source d'Ima Hagga Ali qui présente un apport relativement important (10.98 Mm³), les autres sources fournissent globalement des débits faibles conformément aux conditions géologiques et hydrogéologiques correspondant (faibles perméabilités et réservoir souvent discontinus)

2) Pompages destiné à l'AEP

Les pompages destinés à l'AEP sont auxiliaires et n'impactent pas beaucoup le bilan des nappes du Bajocien-Bathonien.

3) Pompages destiné à l'irrigation

La zone d'étude a fait l'objet en 2011, d'une enquête par commune dont le but est de dresser un inventaire exhaustif des points d'eau qui captent les eaux souterraines. Il s'agit d'une enquête réalisée par l'ABHGZR en 2011 à l'échelle de sa zone d'action. Ses éléments concernent le nombre des exploitations équipées de motopompes, les points d'eau, les superficies et le type des cultures irriguées.

D'après une première analyse de ces résultats, des incohérences entre les différents modes d'estimation des volumes prélevés ont été observés : mode direct à partir des régimes de pompage déclarés (débit x durée de pompage), évaluation à partir des besoins en eau et des efficacités d'irrigation, reconstitution des régimes de pompage à partir de paramètres relevés lors de l'enquête (consommations de gas-oil et puissances des moteurs), etc. Pour pallier à ce problème, une méthode indirecte est utilisée, basée sur des corrélations effectuées sur des échantillons significatifs et cela pour choisir des ratios moyens concernant le régime de pompage et des installations, en vue d'évaluer la consommation moyenne en eau à l'hectare.

a. Statistiques sur les enquêtes de terrain

Les points d'eau recensés sont au nombre de 6106, dont 1221 points se trouvent dans le périmètre d'étude. Le Tableau 32 présente les points d'eau recensés par commune, la superficie irriguée correspondante et la première estimation des volumes d'eau pompés.

Tableau 32. Volumes prélevés des eaux souterraines par commune (ABHGZR, 2012)

Commune	Nb de point d'eau	Superficie totale (Ha)	Superficie irriguée (Ha)	Volume (m ³)
En-Nzala	122	444.25	285.85	3 725 023
Gueriss Tiaallaline	438	1044.9	938.855	8 361 796
Lkhang	6	306	306	7 410 209
M'zizel	399	599.75	524.45	6 783 796
Nzala	13	15.5	11.5	278 488
Sidi Ayad	243	593.84	526.24	6 856 335
Total	1221	3004.245	2592.89	33 137 159

La taille des exploitations comprise entre 0.01 Ha et 300 Ha avec une moyenne de 2.45 Ha. Le mode d'irrigation prépondérant est le gravitaire (99.72%), les autres modes étant la goutte à goutte.

D'après les résultats obtenus, il apparaît que le volume recensé lors de l'enquête est de 33.137Mm³. En moyenne, un volume de 12780 m³ est prélevé pour chaque hectare. Ce résultat est vérifié et affiné ci-dessous.

b. Analyse des données des enquêtes et évaluation des volumes prélevés

➤ Ratios moyens relatifs au régime de pompage

Pour le choix des ratios moyens relatifs au régime de pompage, on va discerner parmi toutes les exploitations visitées, celles dont les données semblent être cohérentes, en vue d'établir des ratios moyens significatifs et représentatifs. Pour ce faire, la démarche suivante est adoptée:



Figure 81 : méthodologie de calcul des ratios moyens relatifs au régime de pompage destiné aux nappes du Bajocien-Bathonien

Cette démarche vise à faire :

- + La correction des erreurs ou des coquilles persistant dans la base de données sur les prélèvements : nombre d'heures par jour supérieur à 24, plus de 7 jours dans la semaine, consommation d'énergie qui paraît plutôt être journalière que mensuelle, besoins en eau des cultures excessifs ou au contraire trop en deçà de la réalité,
- + La confrontation entre les régimes de pompage déclarés, les consommations de gas-oil et les puissances des moteurs au niveau de toutes les exploitations,
- + La reconstitution des durées de fonctionnement des installations de pompage et évaluation des volumes pour l'ensemble des exploitations,
- + La corrélation entre les résultats obtenus et la sélection des exploitations dont les données semblent être les plus cohérentes dans leur ensemble.

Après analyser et traiter l'ensemble des données, les exploitations dont les données sont jugées cohérentes sont au nombre de 107, ce qui représente un échantillon relativement significatif. Les ratios moyens concernant les régimes de pompage et les installations (durée, consommation de carburant, puissance installée) sont récapitulés dans le Tableau 33.

Tableau 33. Ratios moyens des régimes de pompage et des installations des échantillons retenus (ORMVAT, 2015).

	Enquête 2011
Régime moyen (nombre d'heures de pompage par an en moyenne par station)	1 105 heures
Puissance moyenne installée par station en moyenne	9.57 CV
Consommation moyenne de gas-oil par station par an en moyenne	1134 litres
Consommation unitaire moyenne	0.31 l/CV/Heure
Ecart par rapport à la norme pour moteur diesel (0.25 l/CV/heure)	+ 17 %
Ratio retenu tenant compte de l'écart constaté par rapport à la norme de 0.25 l/CV/heure	1105 heures de pompage en moyenne par exploitation

➤ *Consommations moyennes à l'hectare et évaluation des volumes prélevés*

Pour évaluer la consommation moyenne à l'hectare, un ajustement des volumes prélevés des échantillons choisis en fonction de la superficie correspondante a été effectué. Il s'agit de vérifier un modèle linéaire selon l'équation suivante :

$$\text{Volume Prélevé} = \text{Dotation} \times \text{Superficie}$$

Les corrélations entre les volumes d'eau prélevés et les superficies correspondantes pour chaque commune sont représentées sur la Figure 82.

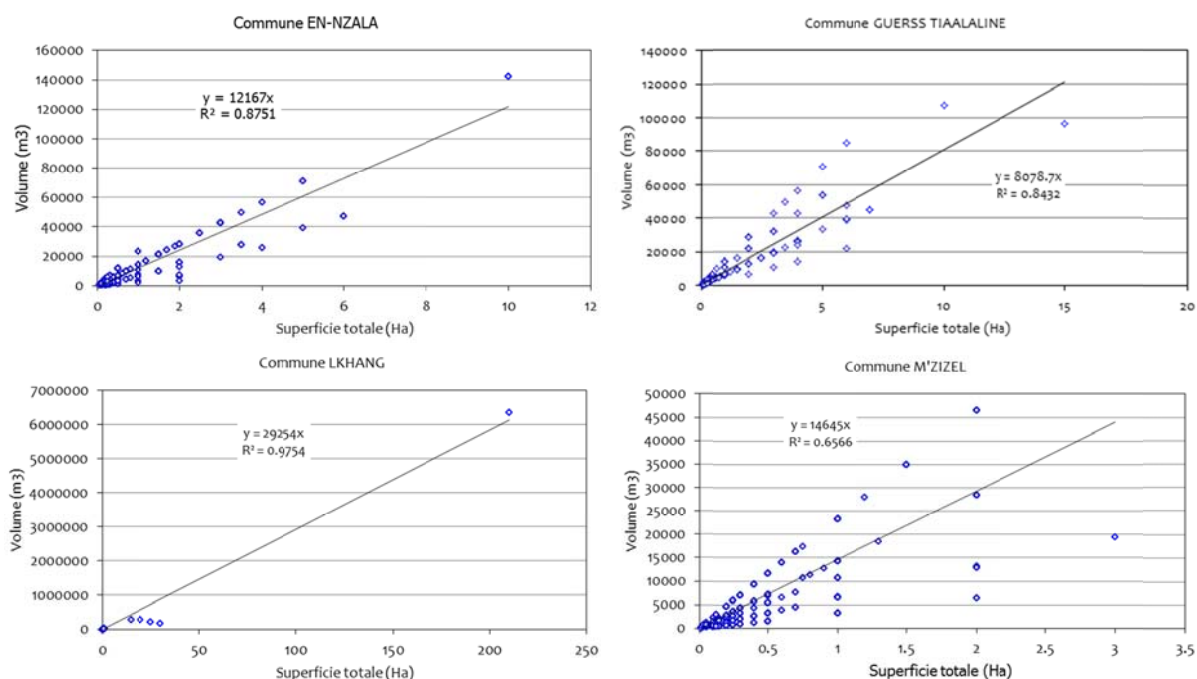


Figure 82 : Corrélations entre les volumes d'eau prélevés et les superficies

Les résultats obtenus apparaissent globalement satisfaisantes avec des coefficients de corrélations entre 65% et 97% et une consommation moyenne à l'hectare de 8000 à 29 500 m³ selon les communes (Tableau 34). Au total un volume de 35 Mm³ est obtenu.

Tableau 34. Volumes d'eau prélevés pour l'irrigation dans les hauts bassins de Ziz et Rhéris

Commune	Superficie irriguée (Ha)	Consommation moyenne (m ³ /ha)	Volume (m ³)
En-Nzala	285.85	12 500	3573125
Gueriss Tiaallaline	938.855	8000	7510840
Lkhang	306	29 500	9027000
M'zizel	524.45	14 500	7604525
Sidi Ayad	526.24	14 000	7367360
Total	2592.89		35 082 850

Les volumes prélevés dans l'ensemble de la zone y compris les zones hors les systèmes aquifères concernés du Bajocien-Bathonien sont estimés à environ 35 Mm³ (Tableau 34), valeur légèrement supérieure au volume recensé lors de l'enquête (33 Mm³). Par projection, la consommation moyenne à l'hectare pour les unités hydrogéologiques concernées est de 12500 m³/ha pour l'unité de Mititaoute et de 14000 m³/ha pour l'unité de Tamdart – Tamagourt, soit un apport global de 6.53 Mm³.

L'évaluation des volumes d'eau prélevés pour l'irrigation selon une méthode indirecte, basée sur les consommations moyennes à l'hectare, est considérée globalement fiable.

4.4.3.3 Bilan global du Bajocien-Bathonien

Le bilan global des systèmes aquifères du Bajocien-Bathonien est présenté dans le Tableau 35.

Tableau 35. Bilan global du système Bajocien – Bathonien des hauts bassins de Ziz et Rhéris

ENTREES Mm ³	Infiltration pluviales	15.15
	Infiltration dans le lit des oueds	12.61
	Retours des eaux d'irrigation	1.31
	Total entrée	29.07
SORTIES Mm ³	Sources	17.71
	Pompages destinés à l'irrigation	6.53
	Total sortie	24.24
BILAN		+ 4.83

Le bilan obtenu montre d'une part que l'essentiel de la recharge s'effectue par les infiltrations pluviales (52%) et dans le lit des cours d'eau (43%) et de moindre importance par retours des eaux d'irrigation (5%), ce qui atteste que les nappes du Bajocien-Bathonien sont indépendantes.

D'autre part, les sources participent fortement à la décharge des nappes avec 73% des sorties, suivie par les pompages destinés à l'irrigation (27%).

Globalement le bilan obtenu est légèrement positif, vu la difficulté d'accès aux eaux des nappes profonde du Bajocien-Bathonien.

4.5 Conclusion

La compréhension de la géométrie du réservoir souterrain a été réalisée suite à l'établissement des différentes coupes hydrogéologiques en se basant sur des renseignements fournis par la géophysique, la stratigraphie et la lithologie des forages et sondages. Ces coupes ont permis de bien définir les caractéristiques de la structure géologique, la géométrie et l'extension de différentes unités hydrogéologiques des trois complexes aquifères.

L'établissement des cartes structurales (cartes du mur et du toit pour les nappes profondes et la carte du substratum imperméable pour la nappe phréatique) et la superposition de ces dernières, a permis la détermination de l'épaisseur des aquifères profonds de l'Aalénien-Bajocien (jusqu'à 160 m) et des aquifères du Bajocien-Bathonien (jusqu'à 100 m). Vu la grande puissance du Lias inférieur - Domérien, et l'absence de données suffisantes, le calcul de son épaisseur n'a pas été possible.

À l'exception du Lias inférieur-Domérien, la structure des unités hydrogéologiques de l'Aalénien-Bathonien et du Bathonien-Bajocien, au nombre de 15 sont très hachées et caractérisées par des changements de faciès et d'épaisseur, ce qui est considéré comme un facteur limitant pour le développement des réservoirs aquifères importants.

L'analyse morphologique de la surface piézométrique confrontée avec la géologie montre pour Lias-Domérien, une alimentation à partir des aires d'affleurements nord, généralement l'écoulement est du nord vers le sud. Concernant les unités de l'Aaléno-Bajocien et du Bajocien-Bathonien, l'écoulement dépend de la configuration de chaque unité, généralement des extrémités vers les centres. Dans ces zones, la mise en charge des eaux est fréquente. Les isopièzes montrent un certain parallélisme, notamment pour Lias inférieur-Domérien ce qui confirme la continuité de ce réservoir aquifère puissant. Ailleurs, le parallélisme des isopièzes est souvent interrompu en indiquant une certaine discontinuité hydraulique due à des barrières étanches sédimentaires ou structurales.

Les suivis piézométriques de différentes nappes montrent une stabilité dans les niveaux. Les essais de pompage montrent que les nappes sollicitées ne sont pas homogènes, même à l'échelle d'une seule

unité hydrogéologique; des limites étanches, sous forme de failles ou des changements latéraux de faciès favorisent des caractéristiques hydrodynamiques hétérogènes. Parfois ces nappes, notamment du Bajocien-Bathonien contiennent des petites poches d'eau d'extensions et de puissance limitées (Cas du forage 1011/47), où le niveau d'eau n'est pas revenu à son état initial après l'arrêt du pompage. La Figure 83 et la Figure 84 qui résument les transmissivités moyennes obtenues, respectivement pour l'Aaléno-Bajocien et pour le Bajocien-Bathonien, montrent que les unités d'En-Nzala – Tazrouft et l'unité de Tamdart – Tamagourt sont les plus transmissives,

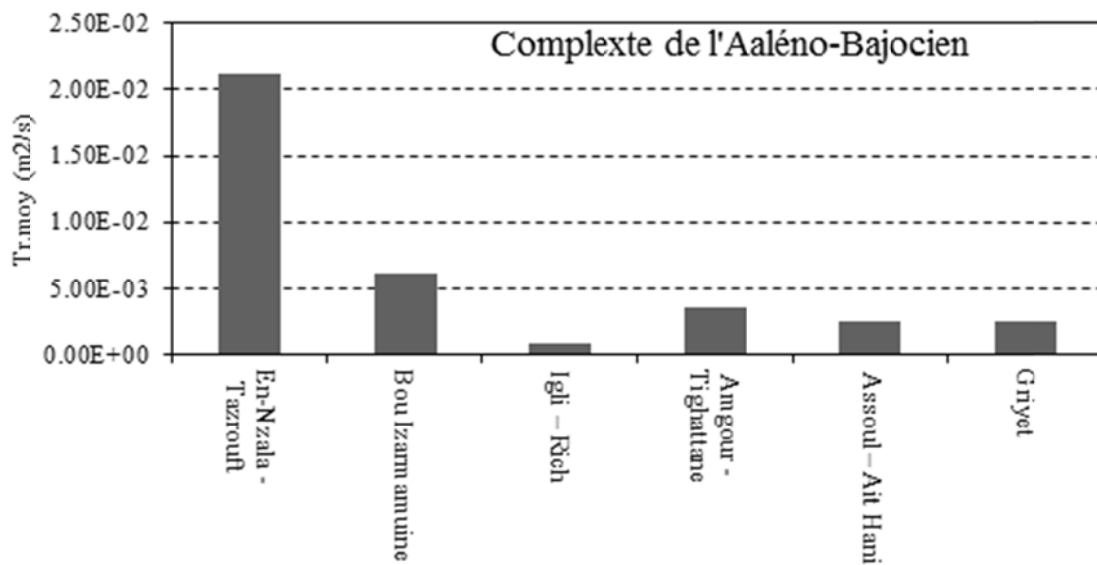


Figure 83 : Transmissivités moyennes dans les unités de l'Aaléno-Bajocien

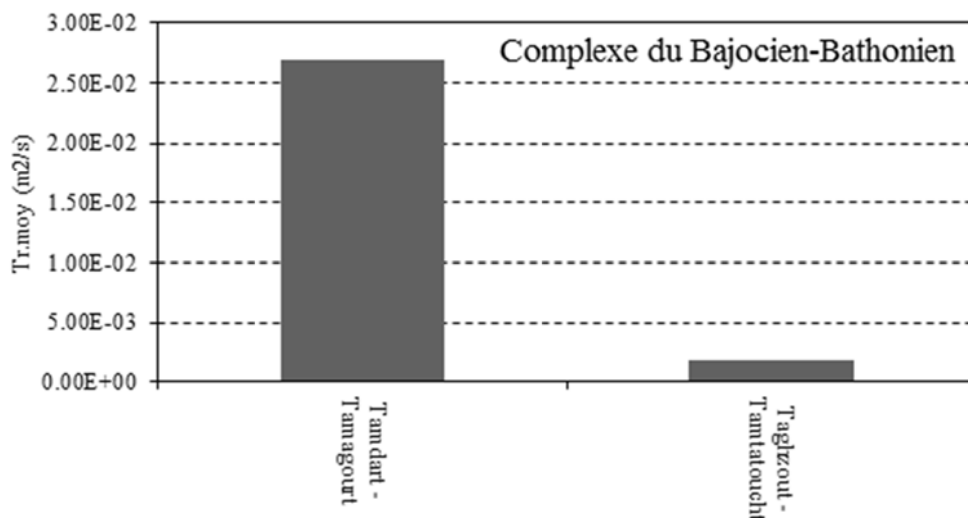


Figure 84 : Transmissivités moyennes dans les unités du Bajocien-Bathonien

Les bilans des nappes identifiés montrent que les réserves les plus importantes concernent le Lias inférieur – Domérien. Le bilan de ce dernier est en équilibre (90 Mm^3), ce qui constitue une ressource d'alternative en cas de manque d'eau en surface (Figure 85). Les flux entrants des zones nord constituent la principale source d'alimentation avec un apport de l'ordre de 56%, suivi par le drainage descendant à travers certains tronçons des cours d'eau de fortes perméabilités (cluses) et par les infiltrations directes sur les aires d'affleurement qui représentent chacun 16% de la recharge total des entrées de la nappe. Quant aux sorties, les sources dominent avec 80% des sorties, en assurant la continuité des écoulements des majeurs cours d'eau du Haut Atlas. Les flux sortants vers le bassin Crétacé d'Errachidia au sud représentent 20% des sorties et se concentrent au niveau de 3 zones de drainages principales (Figure 22).

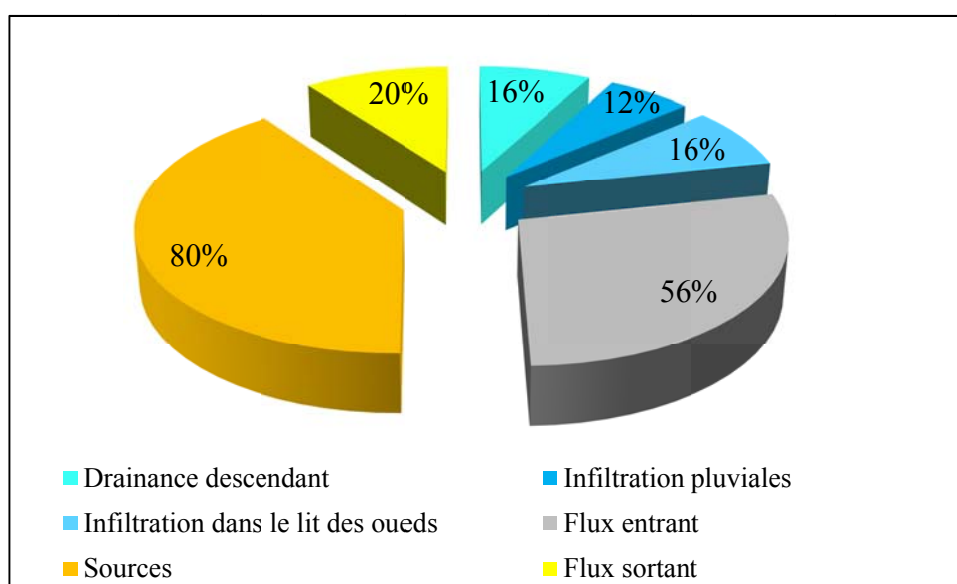


Figure 85 : Bilan global du Lias inférieur-Domérien des hauts bassins de Ziz et Rhéris

Les bilans des nappes Aaléno-Bajociennes (Figure 86) sont réduits par rapport celui du Lias inférieur-Domérien, ils ne dépassent dans les meilleurs cas 6 Mm^3 (Unité d'Assoul – Ait Hani), ce qui confirme que ces unités sont indépendantes et ne disposent pas suffisamment de sources d'alimentation autres que pluviale. Les infiltrations dans les lits des cours d'eau sont relativement mineures, vu la réduction des aires de contacts et les apports en eaux superficielles souvent discontinus (crues).

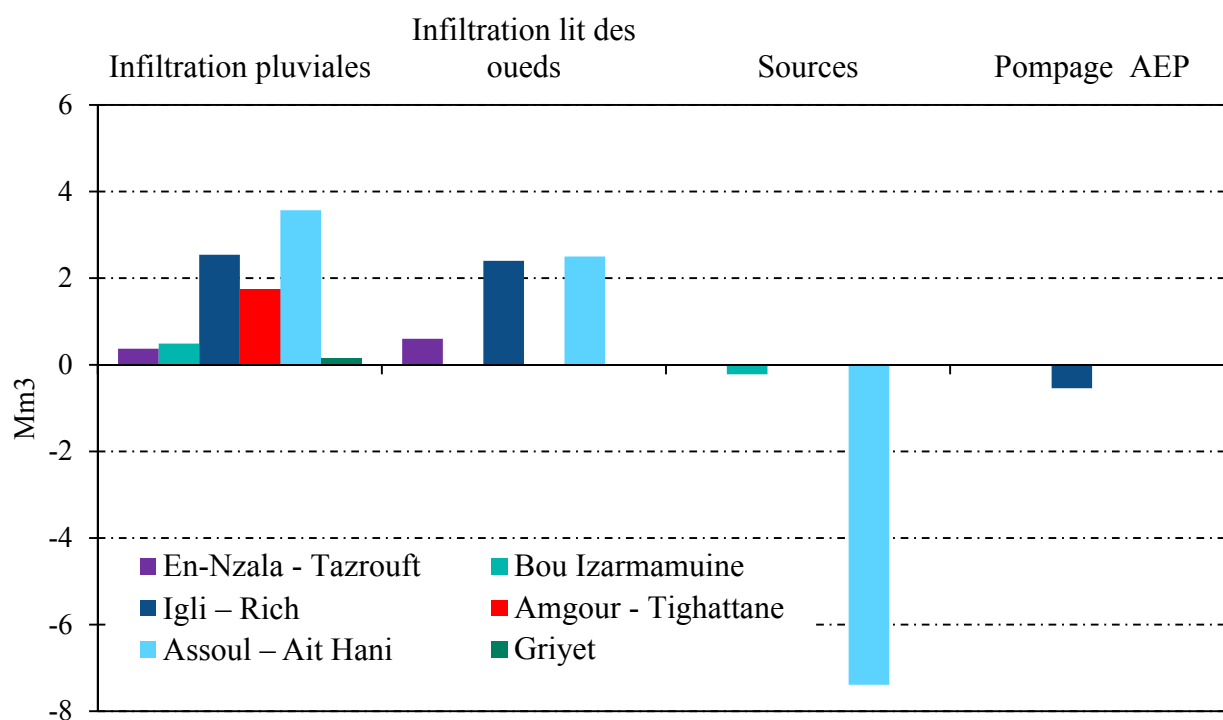


Figure 86 : Bilans détaillés des unités aquifères de l'Aaléno-Bajocien des hauts Ziz et Rhéris

Quant aux nappes du Bajocien-Bathonien (Figure 87) et à part l'unité de Tamdart – Tamagourt, les autres unités ont des bilans encore plus faibles, de quelques Millions de mètres cubes. Conformément aux synthèses géologiques et hydrogéologiques, cette faiblesse est le résultat surtout de la faible perméabilité dans les aires d'alimentation.

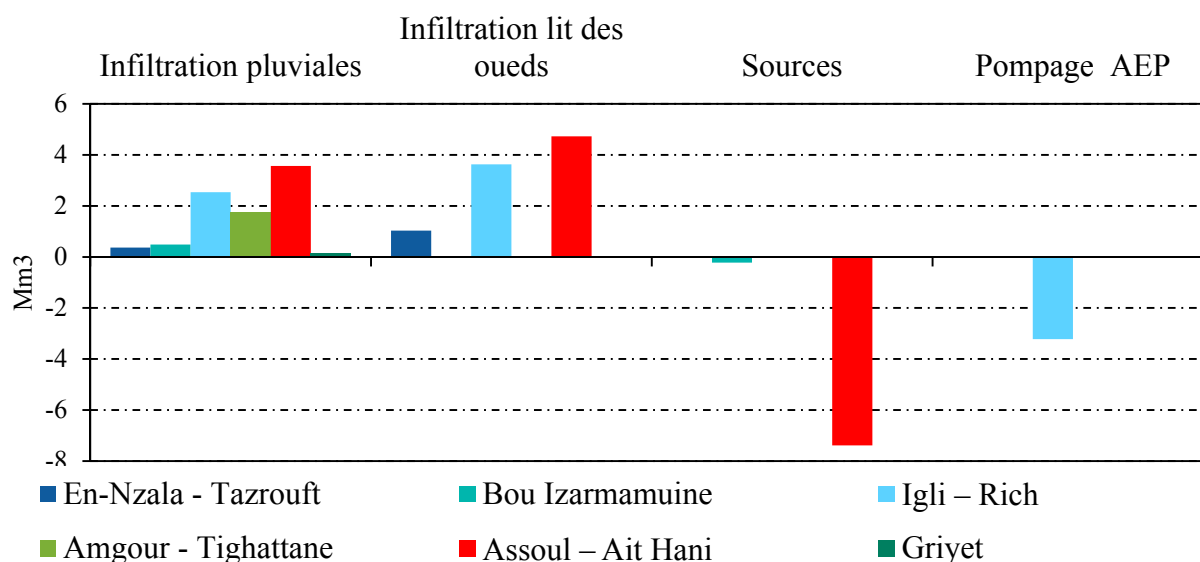


Figure 87 : Bilans détaillés des unités aquifères du Bajocien-Bathonien des hauts Ziz et Rhéris

Chapitre 5. Caractérisation hydrogéologique des systèmes aquifères superficiels

5.1 Introduction

Les larges vallées ou dépression du Haut Atlas sont parfois le siège des nappes d'accompagnement qui se répartissent le long des grands cours d'eau. Au niveau de la zone d'étude, seule la nappe de Rich est la plus développée, elle représente la ressource en eau la plus facilement accessible mais particulièrement vulnérable aux phénomènes de sécheresse et de la pollution. Elle représente le vecteur de développement du centre Rich et ses localités environnantes (Figure 88).

Cette nappe dépend des écoulements superficiels de l'oued Ziz et de l'oued Sidi Hamza ayant un régime hydrologique irrégulier qui dépend des précipitations souvent brèves et violentes.

Malgré la succession des périodes de sécheresses parfois longues et les besoins en eau de plus en plus élevés, le niveau de la nappe est maintenu relativement en équilibre. Dans ce contexte, une caractérisation hydrogéologique et une modélisation hydrodynamique semblent nécessaires pour la compréhension de l'hydrodynamisme des eaux souterraines et l'évaluation des différents termes du bilan de cet aquifère et ce, afin de savoir dans quelles mesures les potentialités en eaux de cette nappe permettent-elles un développement soutenu du secteur et de répondre à une stratégie de gestion durable des ressources en eau dans la région.

Ainsi, l'usage de plus en plus important d'engrais chimiques dans les terres agricoles et l'augmentation des rejets domestiques et industriels rendent cette nappe plus vulnérable à la pollution, d'où la nécessité de cartographier les zones sensibles à la pollution.

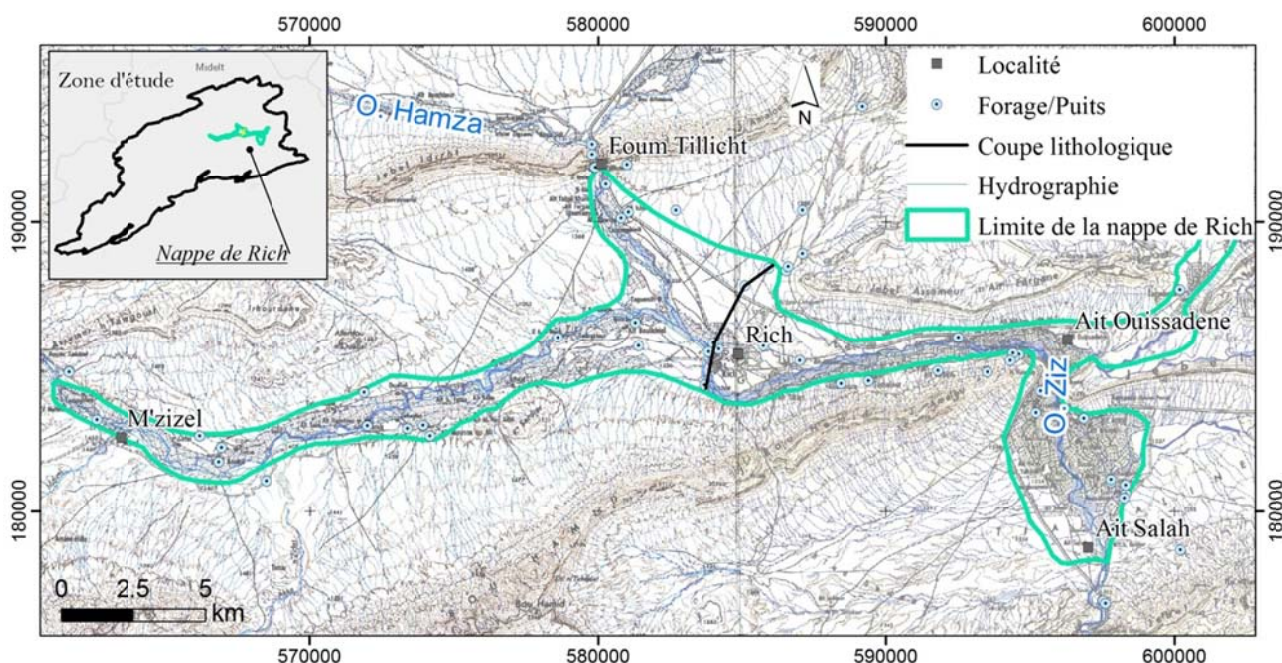


Figure 88 : Situation de la nappe de Rich

5.2 Géométrie, lithologie et piézométrie

Les synthèses géologique et hydrogéologique établies précédemment (Chapitre 2 et Chapitre 4) ont permis l'identification de plusieurs systèmes aquifères, d'âge et de natures variées. Cependant, l'insuffisance ou parfois l'imprécision des données relatives à la géométrie et l'hydrodynamique des réservoirs aquifères identifiés empêchent le développement des modèles hydrodynamiques à l'échelle de toute la zone. Avec ces conditions, seule la nappe alluviale de Rich qui dispose des données suffisantes a permis le développement d'un modèle hydrodynamique dans les règles de l'art.

Pour évaluer le fonctionnement hydraulique de la nappe de Rich, il importe de déterminer sa géométrie, la formation intervenant dans la détermination des échanges hydrauliques, ainsi que les zones d'affleurement qui constituent le lieu de la recharge (Castany, 1998). Le modèle géométrique proposé repose sur l'interprétation des coupes lithologiques des forages disponibles, au nombre de 40 (ABHGZR, 2011), sur les affleurements observés au terrain et sur les cartes géologiques disponibles ; il s'agit d'un bassin d'effondrement affecté par un ensemble de failles, en donnant naissance à des blocs basculés du Lias et du Dogger, habituellement descendantes conformément à la pente générale du bassin (Margat, 1952 ; El Kochri, 1981 ; El Kochri, 1996), sur laquelle, se sont déposés des matériaux quaternaires en formant une nappe alluviale (Figure 89). Ce matériel est déposé sur les

marnes du Toarcien-Aalénien qui constituent un substratum imperméable généralisé (Ait Addi, 1998 et 2000).

Les limites de l'aquifère ont été déterminées à partir des formations géologiques superficielles et les coupes lithologiques des forages hydrogéologiques. Selon Anderson et Woessner (1992), ces limites doivent coïncider avec les formations géologiques imperméables ou celles dont la perméabilité est d'au moins deux ordres de grandeurs inférieure à celle de l'aquifère.

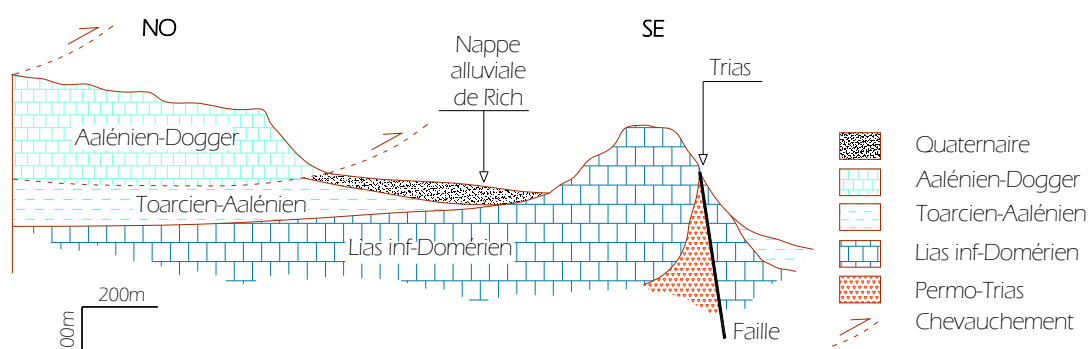


Figure 89 : Relations géologique et structurale entre la nappe alluviale de Rich et les formations géologiques profondes (Margat, 1952, modifié).

En analysant les cartes géologiques et les coupes lithologiques disponibles, on trouve des poudingues, des graviers et des galets en relation avec les alluvions des lits actuels des oueds. En allant vers les rides anticlinales avoisinantes, ce sont des dépôts fluvio-lacustres qui apparaissent avec des calcaires gréseux, parfois marneux, peu perméables. Ces limites imperméables ou semi-perméables limitent le flux d'eau souterraine vers l'aquifère.

Des études géologiques réalisées sur le Haut Atlas (Ait Addi, 1998 et 2000) ont mis en évidence un substratum Toarcien-Aalénien généralisé et puissante. Cependant l'analyse des coupes lithologiques ayant traversé le substratum montre que sa puissance est réduite, elle croit vers les axes des cours d'eau traversant la nappe et dépasse rarement 70m (Figure 90).

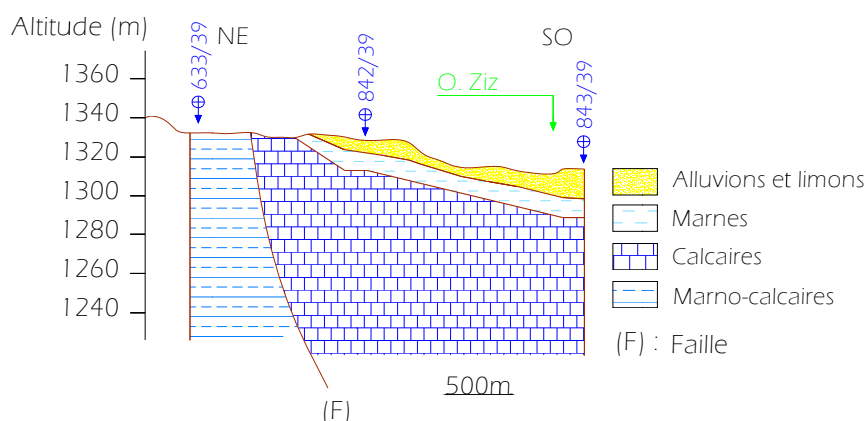


Figure 90 : Coupe géologique de la Figure 89

Le réservoir aquifère est libre, son toit est assimilé à la topographie. Les isohypses du mur du substratum montrent une topographie conditionnée par la tectonique des terrains sous-jacents (Figure 91), il s'enfonce progressivement en direction des cours d'eau avec des pentes allant de 2 à 10%. Localement, des anomalies sous forme des cuvettes sont observées. La puissance du réservoir aquifère, montre un maximum d'accumulation entre Ait Ouissadene et Ait Saleh (entre 10 et 30m). À l'Ouest du centre de Rich, la puissance alluvionnaire est moins importante (de 10 à 20m), elle est fonction de la remontée du substratum, éventuellement sous l'action des failles inverses profondes (El Kochri, 1996). Dans les zones frontières, la puissance oscille entre 6 et 10m.

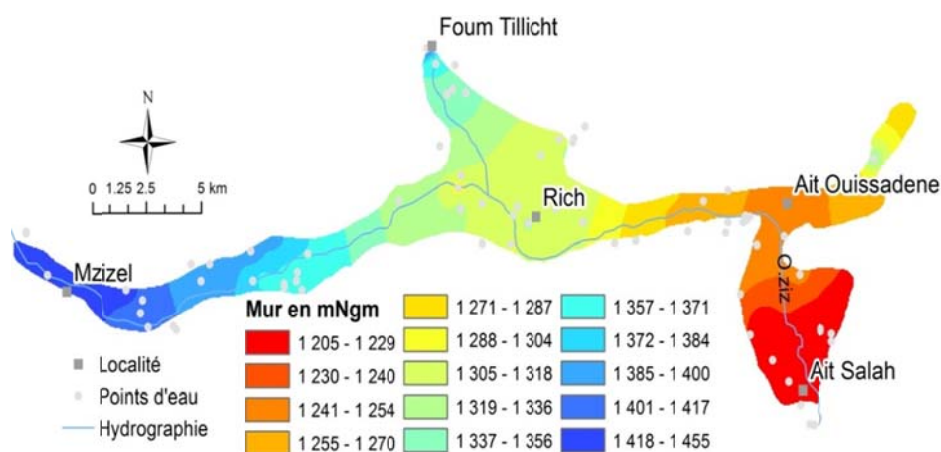


Figure 91 : Isohypes du mur de la nappe de Rich

Conformément à la topographie du substratum, l'écoulement général se fait de l'Ouest vers l'Est entre M'Zizel et Ait Ouissadene et du Nord vers le Sud entre Foum Tillicht et Rich et entre Ait Ouissadene et Ait Salah (ABHGZR, 2011 ; El Kayssi et al., 2016) montrant ainsi une alimentation depuis les cluses de Foum Tillicht et de M'Zizel (Figure 91). La convergence des isopièzes autour

des cours d'eau, montre une perte vers les eaux superficielles. Conformément à la description géologique ci-dessus, les isopièzes deviennent perpendiculaires aux rides anticlinales avoisinantes, ce qui atteste qu'elles sont des limites étanches. Le gradient hydraulique présente une valeur moyenne de 0,03 à 0,05 en partie amont et diminue très sensiblement vers Ait Saleh (0,01 à 0,03) du fait de l'élargissement de la plaine. Il s'accroît en revanche vers M'Zizel et Fom Tillicht (0,05 à 0,7) en liaison avec la diminution de la puissance de la nappe et de la perméabilité du réservoir.

5.3 Modélisation hydrodynamique en régime permanent

5.3.1 Introduction

Ce paragraphe présente les principales étapes d'élaboration du modèle mathématique de la nappe de Rich en régime permanent, ainsi que les résultats obtenus. Les simulations en ont été entreprises en moyennant le logiciel de simulation numérique des écoulements souterrains MODFLOW (modular Tree dimensional finite difference groundwater flow model), développé par l'USGS (United States Geological Survey) (Mc Donald et al., 1988). Le code de calcul utilisé aux différences finies en trois dimensions, fonctionne sous l'interface GMS «Groundwater Modeling System» (EMRL, 1999).

L'élaboration du modèle hydrodynamique en régime permanent s'articule sur la délimitation et la discrétisation du domaine à modéliser, une définition des conditions aux limites, l'analyse et la préparation des données physiques (toit, mur, recharge, etc.) et le calage du modèle. Ce dernier suppose que le système est stationnaire pour une période donnée. On considère alors que la nappe est en régime d'équilibre stable.

Le calage du modèle est obtenu après un certain nombre de simulations pour aboutir à une bonne concordance entre les niveaux piézométriques mesurés sur le terrain et les potentiels calculés par le modèle, en affectant à l'aquifère des valeurs de perméabilité conformes aux données disponibles.

Par ailleurs, la qualité du calage du modèle est appréciée en examinant les critères suivants :

- + La reconstitution de la piézométrie de référence ;
- + La réparation de la perméabilité ;
- + L'erreur du bilan issu du calage.

5.3.2 Logiciel de modélisation et équations d'écoulement

Le modèle numérique de la nappe alluviale de Rich est élaboré à l'aide du logiciel GMS 6.x. Il s'agit

d'une interface graphique modulaire pour MODFLOW, code de calcul aux différences finies en trois dimensions, développé par l'USGS (United States Geological Survey).

Le modèle est construit grâce à l'interface graphique de GMS, à la façon d'un Système d'Information Géographique (SIG), puis converti en un modèle numérique maillé pour les calculs proprement dits. Les résultats obtenus sont exploités grâce à l'interface graphique, ce qui permet, d'une part, de faciliter le calage et d'autre part, de garder une certaine homogénéité des données et de la présentation.

Le code MODFLOW présente l'avantage d'être facile à manipuler et à comprendre. En plus d'être largement utilisé et reconnu dans le domaine de la recherche et de la consultation, il est relativement bien adapté au cas du système aquifère de Rich. Il prend en considération l'écoulement dans un aquifère libre et permet de considérer entre autres l'effet de pompes, de rivières, de la drainance et de la recharge de l'aquifère.

L'équation générale aux dérivées partielles utilisée dans le code MODFLOW pour résoudre l'écoulement transitoire au sein d'un système tri-dimensionnel, poreux, libre, hétérogène et anisotrope est la suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + R \approx S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

H : potentiel hydraulique (L).

K : tenseur de conductivité hydraulique (L.T-1) ;

Ss : coefficient d'emménagement spécifique (L-1) ;

R : terme puits/source (flux unitaires entrants et sortants de l'aquifère) (T-1) ;

T : temps (T).

La résolution de cette équation est effectuée sur un maillage tridimensionnel par un algorithme en différences finies, contraint par les conditions aux limites du système.

Parmi les grandeurs utilisées, on peut distinguer :

- + les variables d'entrée et de sortie ;
- + les paramètres hydrogéologiques du système aquifère qui correspondent à sa géométrie et à la distribution spatiale des perméabilités et des coefficients d'emménagement.

Les variables d'entrée correspondent aux différentes conditions aux limites et aux termes puits/sources. Les variables de sortie sont les hauteurs piézométriques et les débits d'écoulement souterrain calculés par le modèle.

La géométrie est représentée explicitement, en intégrant le toit et le mur de la formation considérée.

5.3.3 Modèle conceptuel

5.3.3.1 Délimitation du domaine à modéliser

La nappe de Rich est une nappe alluviale. Elle se développe dans une large dépression longitudinale, limitée au nord et au sud par un ensemble de rides anticlinales du Jebel Tillicht et du Jebel Bouhamid (Figure 88).

L'analyse des coupes lithologiques des forages mécaniques disponibles montre, un niveau aquifère, constitue par des poudingues, des graviers et des galets en relation avec les alluvions du lit actuel de l'oued Ziz. Les poudingues qui forment généralement le fond de l'aquifère contiennent la réserve principale en eau, alors que les galets et les graviers forment les lieux de cheminement préférentiels et permettent les plus gros débits. En s'éloignant du lit de l'oued Ziz, les alluvions sont remplacées par des éléments plus fins, constituées par des dépôts fluvio-lacustres et des calcaires gréseux, parfois marneux, peu perméables.

Ce matériel perméable et hétérogène est établi essentiellement sur les marnes du Toarcien-Aalénien qui constituent le substratum imperméable de l'aquifère. Il s'agit donc d'une nappe alluviale développée au sein d'un matériel essentiellement alluvionnaire et supportée par un substratum généralisé marneux.

5.3.3.2 Discrétisation du domaine d'écoulement du système aquifère de Rich

La discrétisation spatiale du domaine constitue l'étape permettant de prendre en compte la géométrie et les limites du système dans le modèle d'écoulement.

La zone à modéliser correspond à la zone d'extension de la nappe de Rich qui s'étend sur environ 110 km². Elle est entourée par un ensemble de rides anticlinales, lesquelles sont traversées par l'oued Ziz à l'ouest et l'oued Sidi Hamza au nord formant respectivement les cluses de M'Zizel et de Tillicht.

Selon la densité des données disponibles, la discrétisation horizontale est faite selon un maillage rectangulaire de 200 mètres de dimension, disposées sur 69 lignes et 210 colonnes (Figure 92).

Concernant la discrétisation verticale, elle est faite selon un système monocouche (Figure 93), limité par le terrain naturel au sommet et l'imperméable Toarcien-Aalénien à la base. Les données relatives à la limite basale sont obtenues en exploitant les données lithologiques de quarante forages ayant atteint le substratum.

Les mailles situées à l'extérieur des zones d'extension du système aquifère ont été inactivées pour restituer précisément la superficie du réservoir aquifère. Les mailles actives, qui correspondent effectivement à l'emprise du système, sont au nombre de 2429 mailles, tandis que les mailles frontières sont au nombre de 546.

5.3.3.3 Conditions aux limites

Le choix des conditions aux limites constitue une phase importante pour la mise en œuvre du modèle. Leur impact sur la qualité des résultats est majeur. La synthèse géologique et hydrogéologique du secteur ont permis la détermination de la nature des limites du système aquifère, ses particularités et de les intégrer au sein du modèle. Ces conditions de types « flux imposé » et « potentiel imposé » ont été formulées grâce à l'analyse de la carte piézométrique de référence 1980 et l'analyse des eaux de crues qui proviennent de l'extérieur du domaine modélisé, contrôlés à l'entrée et à la sortie de la nappe, par les stations d'Amouguer M'Zizel et de Foug Tillicht (Figure 92).

L'application de la loi expérimentale de Darcy et les possibilités offertes par les outils SIG ont permis de calculer les flux entrants et sortants au droit des cluses de M'zizel, de Foug Tillicht et de Foug Zaabel. Ces conditions aux limites se répartissent de la façon suivante :

- + deux conditions de flux imposé entrants ont été retenues (état de référence de 1980) au droit des cluses de M'zizel et de Foug Tillicht (Figure 92), qui constituent les limites nord et ouest de la nappe avec une continuité hydraulique avec l'extérieur du domaine à modéliser le long du lit de l'oued Ziz et oued Sidi Hamza ;
- + une condition de flux sortant a été retenue (état de référence de 1980) au droit la cluse de Foug Zaabel (Figure 92), qui constitue la limite sud de la nappe avec une continuité hydraulique avec l'extérieur du domaine à modéliser le long du lit de l'oued Ziz ;

- + Une limite à potentiel imposé le long des oueds Ziz et Sidi Hamza (Figure 92), à l'intérieur du domaine à modéliser ;
- + Une limite à flux nuls dans le reste de la nappe (Figure 92), car ils correspondent aux limites naturelles du Quaternaire, sans continuité hydraulique avec les formations géologiques latérales (marnes du Toarcien-Aalénien).

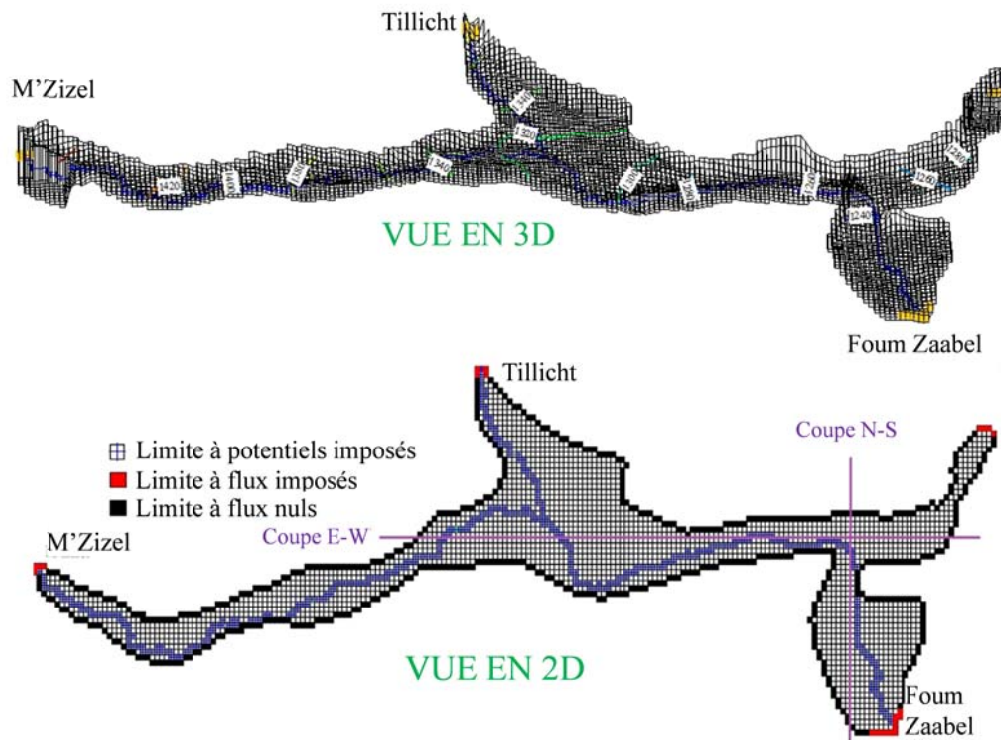


Figure 92 : Discretisation du domaine d'étude avec emplacement de deux coupes N-S et E-O

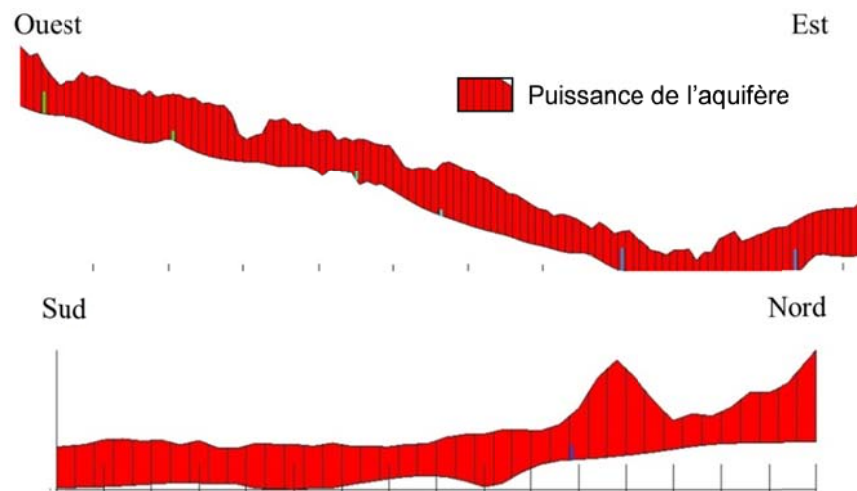


Figure 93 : Coupes N-S et E-O de la Figure 92, extraites du domaine discrétisé

5.3.4 Préparation des données du modèle

Les principales données introduites au modèle correspondent à la piézométrie de référence, à la géométrie de l'aquifère, aux caractéristiques hydrodynamiques et aux entrées et aux sorties de la nappe.

5.3.4.1 Piézométrie de référence et sollicitations de la nappe

La piézométrie de référence choisie pour la simulation du modèle en régime permanent est celle relevée en 1980 (Figure 94), qui correspond à l'état avant le début des pompages. Le choix de cet état est justifié par le fait que c'est le plus ancien état disponible et que, à cette époque, la nappe était très peu sollicitée et sous un régime naturel d'alimentation et de décharge.

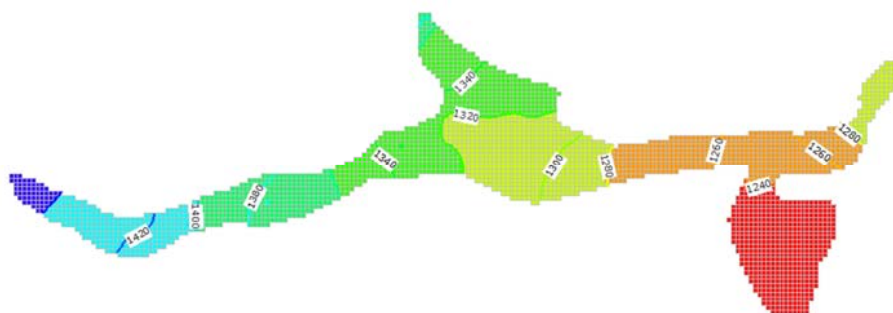


Figure 94 : Piézométrie de référence de la nappe de Rich, Etat de 1980

5.3.4.2 Géométrie de l'aquifère

La géométrie de l'aquifère est déterminée en produisant la carte du toit et celle du mur (Figure 95). La carte du toit correspond à la topographie et celle du mur est générée en exploitant les coupes lithologiques de 40 forages traversant complètement le réservoir aquifère jusqu'à le substratum marneux.

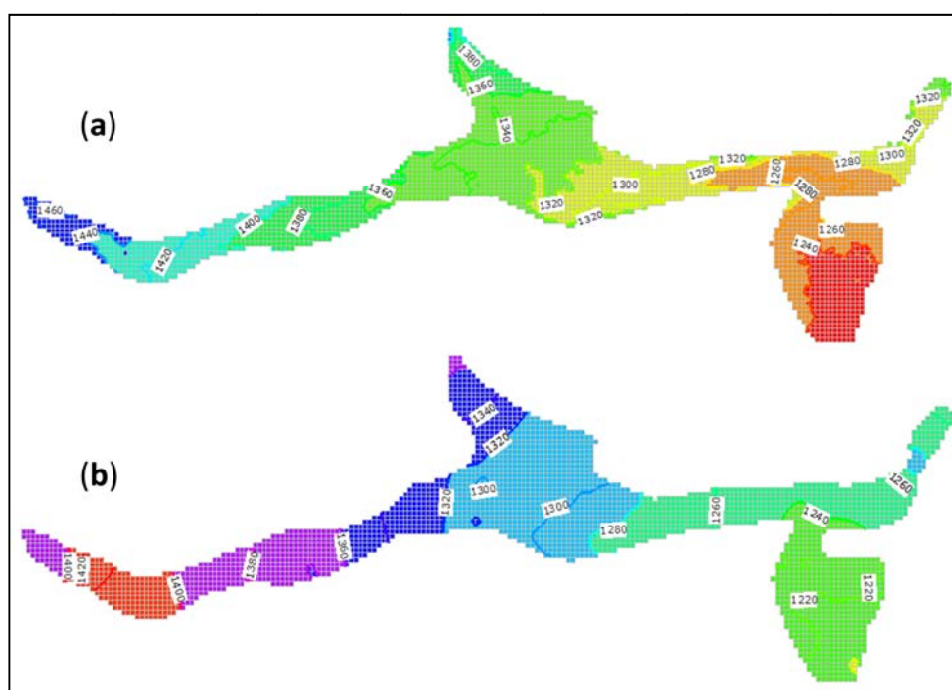


Figure 95 : Isohypsés du toit (a) et du substratum (b) de la nappe de Rich

5.3.4.3 Perméabilité

Les essais de pompage réalisés dans la zone d'étude concernent seulement les nappes profondes. Pour pallier à ce problème un rapprochement aux valeurs ponctuelles de la perméabilité a été fait en affectant à chaque faciès sa perméabilité correspondante, en se basant sur la classification de De Marsily, 1981 (Tableau 36).

Tableau 36. Conductivités hydrauliques correspondantes aux faciès lithologiques selon De Marsily (1981)

Faciès lithologique	Conductivité correspondante (m/s)
Galets	$10^{-1} - 10^{-2}$
Graviers	$10^{-1} - 10^{-5}$
Calcaires gréseux	$10^{-3} - 10^{-5}$
Calcaires marneux	$<10^{-5}$

Cette approche a permis de générer un zoning initial, constitué de quatre champs homogènes de perméabilités, dont les valeurs s'échelonnent entre 10^{-2} m/s et 10^{-7} m/s.

5.3.4.4 Entrée et sorties de la nappe

a) Recharge par les précipitations

Le potentiel pluviométrique de la zone d'étude est établi sur la base des moyennes annuelles de la pluie des stations climatologiques proches (stations de M'zizel, Foug Tillich et Foug Zaâbel).

L'application d'un coefficient d'infiltration directe sur la zone d'étude est effectuée en tenant compte la répartition de la pluie sur les aires d'affleurement de l'aquifère. Ces zones d'alimentation représentent une superficie totale de 110 Km². Le volume de la pluie infiltrée directement sur la zone, moyennant un coefficient d'infiltration de 5% (ABHGZR, 2011) et une pluie moyenne annuelle de 185 mm est de 1.11 Mm³.

b) Recharge par infiltration des eaux de crues

La recharge par infiltration dans les lits des oueds concerne donc l'infiltration des eaux de crues qui proviennent de l'extérieur du domaine modélisé. Les débits des oueds de Ziz et de Sidi Hamza traversant l'aquifère sont contrôlés à l'entrée de la nappe, respectivement, par les stations d'Amouguer M'Zizel et Foum Tillicht. Un coefficient de 4% est appliqué aux apports moyens de ces cours d'eau à leur entrée à la nappe. Ce coefficient est moins important que celui relatif aux précipitations du fait que les vitesses des eaux de crues sont plus élevées. Cette recharge est répartie tout le long des lits des oueds avec un volume calculé de 4.5 Mm³.

c) Flux entrants

La synthèse hydrogéologique a montré qu'il existe une continuité hydraulique de la nappe de Rich avec les lits des cours d'eau de Ziz et de Sidi Hamza, au niveau des cluses de M'zizel et de Foum Tillicht. Ces deux continuités permettent une communication entre la nappe alluviale de Rich et les sous écoulements de ces deux oueds.

Le flux entrant à la nappe au niveau de la cluse de M'zizel est estimé à près de 0.28 Mm³. Il est obtenu en tenant compte d'un front de nappe de 1600 m, un gradient hydraulique de 0.005 et une transmissivité de l'ordre de 10⁻³ m²/s. Le flux entrant à la nappe au niveau de la cluse de Foum Tillicht est estimé à près de 0.26 Mm³. Il est obtenu en tenant compte d'un front de nappe de 1150 m, un gradient hydraulique de 0.007 et une transmissivité de l'ordre de 10⁻³ m²/s.

d) Les prélèvements

Les prélèvements par pompages sont supposés nuls (état avant développement du pompage et du périmètre irrigué).

e) Flux sortants

Les flux sortants sont estimés au droit de la cluse de Foum Zaabel. Ces flux sont estimés à près de 0.47 Mm³ en tenant compte d'un front de nappe de l'ordre de 3000 m, un gradient hydraulique de

0.005 et une transmissivité de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

5.3.5 Résultats et discussions

Le calage du modèle est destiné à reproduire le régime permanent de l'état de référence pris en considération. Il est obtenu après avoir procédé à un certain nombre de simulations pour aboutir à une bonne concordance entre les niveaux piézométriques mesurés sur le terrain et les potentiels calculés par le modèle.

Les opérations du calage sont menées de sorte que :

- + le modèle simule bien la piézométrie de référence, aussi bien dans son allure que dans ses niveaux ;
- + Le modèle affiche des perméabilités qui varient dans des fourchettes raisonnables ;
- + Le modèle arrive bien à restituer le bilan de la nappe, en particulier dans ses composantes les plus connues (convergence acceptable, peu de mailles dénoyées, entrées et sorties par les limites à potentiel imposé réalistes).

5.3.5.1 Ajustement des perméabilités

Une part importante du calage consiste en l'ajustement des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Il s'agit d'une opération importante qui conditionne l'écoulement souterrain. En effet, une fois le bilan des entrées-sorties est équilibré, une précision des écoulements à l'intérieur du modèle a été procédée, c'est en modifiant localement les perméabilités en se basant sur la piézométrie observée et les débits de drainage.

Le calage a été mené en s'attachant à respecter au mieux les grandes plages de perméabilité réellement identifiées dans l'aquifère (Figure 96), et en essayant d'affecter à l'aquifère des valeurs de perméabilité conformes aux données éparses disponibles.

La carte obtenue, suite au calage du modèle, montre la répartition spatiale de la perméabilité (Figure 96). Cette dernière varie entre $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ et $4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. On distingue principalement quatre zones :

- + La zone ouest, entre M'Zizel et Rich, où la perméabilité est faible, elle est inférieure à $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.
- + Au niveau de la zone centrale, la perméabilité s'élève pour atteindre son maximum 10^{-3} m/s au

niveau de la zone principale de convergence des eaux (près du centre du Rich).

- + L'axe « Rich-Ait Ouissadene-Ait Salah » se caractérise par une bonne perméabilité (supérieure à $5 \cdot 10^{-4}$ m/s), cela est justifié par le gradient hydraulique qui devient faible surtout dans la partie sud.
- + A l'Ouest d'Ait Ouissadene, la perméabilité devient faible, inférieure à $5 \cdot 10^{-4}$ m/s.

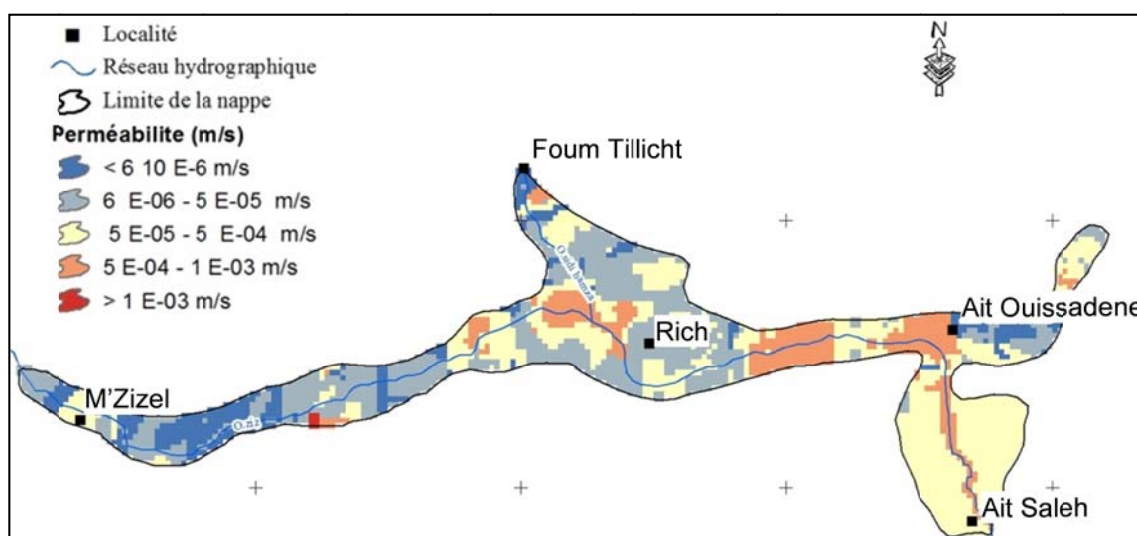


Figure 96 : Carte des perméabilités calculées à l'issue du modèle (m/s)

Le résultat du calage du modèle a montré que la nappe est caractérisée par une hétérogénéité importante en terme de perméabilité et cela en concordance avec l'hétérogénéité lithologique du réservoir aquifère qui est composé d'un matériel variable allant depuis les alluvions grossiers jusqu'à des dépôts fluvio-lacustres marneux ou gréseux.

Les perméabilités reconstituées par le modèle montrent que les zones les plus perméables de (10^{-3} à 10^{-2} m/s) se situent dans la zone de confluence d'oued Sidi Hamza et Ziz et entre du Rich et Ait Ouissadene, ailleurs les perméabilités sont relativement faibles (jusqu'à 10^{-5} m/s).

5.3.5.2 Calage de la piézométrie

La Figure 97 illustre la superposition de la piézométrie calculée par le modèle avec celle observée en 1980 et montre un calage satisfaisant.

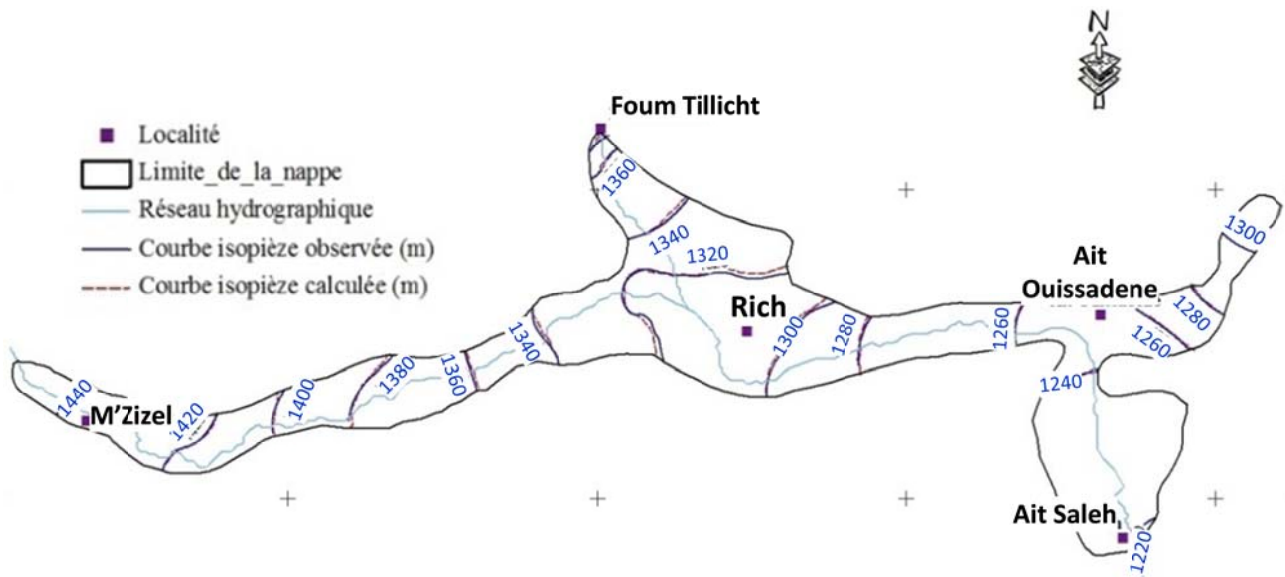


Figure 97 : Comparaison entre la piézométrie calculée et celle observée

Le calage du modèle en régime permanent a été réalisé sur la base des données recueillies durant l'année hydrologique 1980 par le fait que le bilan global de la nappe en cette année est équilibré. Les simulations pendant cette phase sont basées sur les infiltrations pluviales, les infiltrations le long des cours d'eau et le drainage souterrain. Ce calage a été réalisé en comparant les valeurs piézométriques calculées et celles mesurées au niveau de plusieurs puits contrôlés par l'Agence (Figure 98).

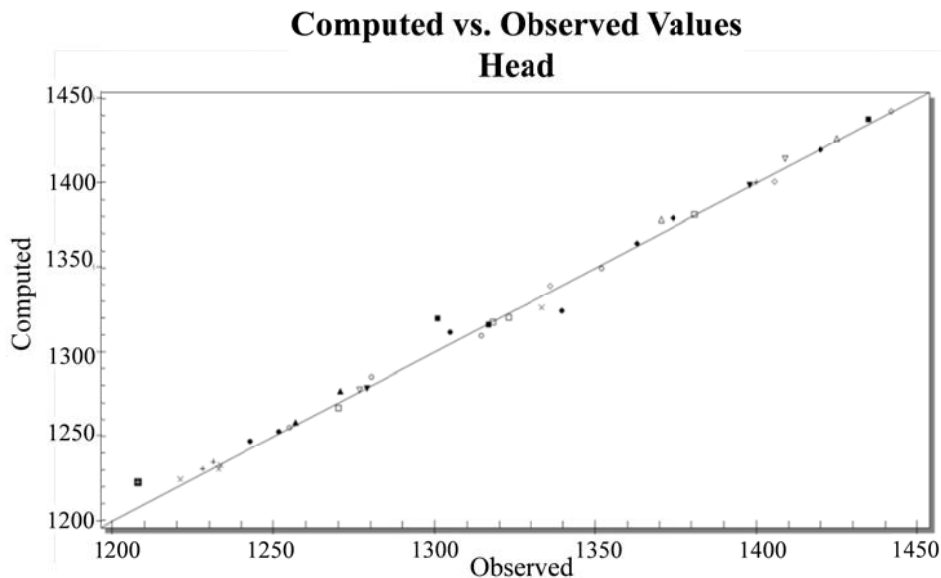


Figure 98 : Corrélation entre la piézométrie calculée et mesurée en régime permanent

L'examen du graphe de calibration (Figure 98), résultant du modèle montre une bonne concordance entre la piézométrie calculée et celle mesurée sur le terrain. L'écart entre les deux piézométries ne

dépasse pas 1 mètre pour la majorité des points d'observation.

5.3.5.3 Bilan de la nappe

Le calage du modèle en régime permanent sur l'état de référence de 1980 a permis d'obtenir un bilan équilibré dont les composants sont présentés sur le Tableau 37:

Tableau 37. Bilan hydrique calculé en régime permanent

Entrées Mm³	Recharge par infiltration des eaux de crues	4.5698
	Drainage souterrain	0.0007
	Recharge par les précipitations	2.2729
	Total entrées	6.8433
Sorties Mm³	Oueds	6.8847
	Drainage souterrain	0.0002
	Total sorties	6.8848
Bilan		-0.0415

Le bilan obtenu par le modèle en régime permanent montre que l'essentiel de la recharge de la nappe s'effectue par l'infiltration des eaux de crues avec un taux de 67%. La recharge par les précipitations représente seulement 33% des entrées de la nappe.

Les résultats préliminaires de ce modèle constituent la base de la simulation future en régime transitoire. Ce dernier permettra d'étudier l'effet des prélèvements par pompage sur la nappe et les prévisions futures sur l'exploitation des ressources en eau souterraines de la région de Rich.

5.4 Modélisation hydrodynamique en régime transitoire

Dans ce paragraphe une modélisation de la nappe de Rich en régime transitoire a été faite en se basant sur le modèle calé en régime permanent. Les objectifs majeurs de cette simulation sont :

- + de reproduire l'évolution piézométrique depuis le début du développement des pompes, de 1980 jusqu'à 2008 ;
- + d'établir la carte de répartition du coefficient d'emmagasinement ;
- + de suivre la variation de la réserve en eaux.

5.4.1 Matériel et méthodes

5.4.1.1 Modèle conceptuel

Un modèle conceptuel a été établi, il est basé sur le modèle calé en régime permanent (El Kayssi et al., 2016). Selon Bear et Verruijt (1987), le bon modèle conceptuel devrait décrire la réalité de manière simple et conforme aux objectifs de modélisation et aux exigences de gestion. Dans cette étude, l'aquifère a été discrétisé en une grille à différences finies comprenant 69 lignes et 210 colonnes orientées selon la direction générale de l'écoulement des eaux souterraines. La taille des cellules a été fixée à 200m par côté. Les mailles actives, qui correspondent effectivement à l'emprise de la nappe, sont au nombre de 2429, tandis que les mailles frontières sont au nombre de 546. Verticalement, l'aquifère était divisé en une seule couche et les hauteurs des mailles correspondent aux épaisseurs réelles des formations quaternaires. Les tronçons des rivières supposés en équilibre avec la nappe sont représentés explicitement par les fonctions «River» du code Modflow/GMS. Le débit échangé est contrôlé indirectement en fixant la valeur de la conductance.

Selon les conditions hydrogéologiques du secteur, trois conditions aux limites ont été identifiées 1) flux imposé au niveau des cluses de M'zizel, Tillicht et de Foum Zaabel 2) potentiel imposé le long des oueds Ziz et Sidi Hamza à l'intérieur du domaine à modéliser 3) limite à flux nul dans le reste de la nappe (Figure 99).

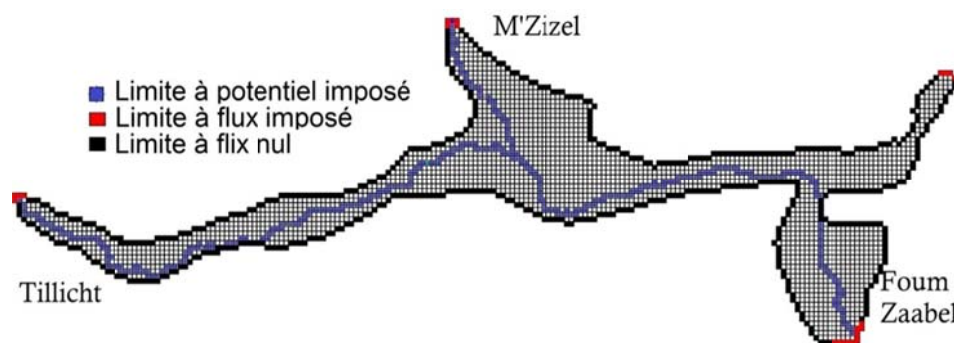


Figure 99 : Discretisation du domaine modélisé et conditions aux limites de la nappe du Rich

La piézométrie de référence choisie pour la simulation du modèle est celle relevée en 1980. Le choix de cet état est justifié par le fait que c'est le plus ancien état disponible et que, à cette époque, la nappe était très peu sollicitée sous un régime naturel d'alimentation à partir des précipitations et du drainage naturel par les cours d'eau (ABHGZR, 2011). La recharge par la pluie est estimée en appliquant un coefficient d'infiltration directe de 5% (Direction de la Région Hydraulique du Guir-Rhéris-Ziz, 2007) de la pluie moyenne sur les différentes zones d'affleurement de l'aquifère. Les flux

entrant ont été estimés à environ 0.54 Mm^3 en se basant sur une transmissivité de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et un gradient hydraulique de 5% à 7%, alors que les flux sortant sont estimés à 0.47 Mm^3 en se basant sur une transmissivité de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et un gradient hydraulique de 3%.

Les perméabilités de l'aquifère : sont aussi celles déduites du calage en régime permanent. La recharge par infiltration et les apports des cours d'eau ont été calculés pour chaque année. Les prélèvements par pompage sont recueillis auprès de l'Office National de l'Eau Potable et introduits ponctuellement dans le modèle, ils correspondent à deux forages d'alimentation en eau potable dont les indices sont P.722/39 et P.674/39. Les prélèvements destinés à l'irrigation ont été évalués par estimation indirecte des besoins en eau de chaque culture irriguée.

En plus des paramètres déjà introduits dans le modèle permanent (géométrie, conditions aux limites et perméabilités, flux, etc.), les données suivantes sont introduites :

Coefficient d'emmagasinement : Dans l'étude des nappes d'eau souterraines à surface libre, la détermination du coefficient d'emmagasinement revêt un aspect primordial, ce paramètre conditionnant la durée d'établissement du régime stabilisé ainsi que le mécanisme d'alimentation et de drainage (Castany, 1998). Un certain nombre d'hydrologues ont noté l'effet de ce paramètre sur la durée du drainage. Meinzer (1923) a déclaré que la majeure partie de l'eau de gravité contenue dans les roches ou le sol est fournie uniquement pendant le cycle de drainage, mais qu'il n'y a apparemment aucune limite de la durée pendant laquelle le drainage lent se poursuivra. Il a noté aussi que les matériaux à texture fine produisent non seulement moins d'eau que les matériaux à texture grossière, mais aussi plus lentement.

En absence de mesures réelles de ce paramètre, il a été considéré que chaque faciès géologique à une porosité relativement constante. Detay (1993) et Castany (1998) ont donné une classification des réservoirs aquifères en affectant à chaque faciès lithologique une porosité efficace moyenne (Tableau 38).

Faute de données réelles de terrain ou du laboratoire, avec cette schématisation, il a été possible d'assurer le calage du modèle et sa bonne représentativité lors de la simulation du régime transitoire.

Tableau 38. Extrait des porosités moyennes des principaux réservoirs aquifères (Detay, 1993 ; Castany, 1998)

Faciès	Porosité totale en %	Porosité efficace en %
Limons	36%	2%
Calcaire fissuré	4,8 %	2 à 10 %
Alluvions	-	8 à 10 %
Sable fin	35%	10%
Sable moyen	35%	15%
Sable gros	35%	20%
Gravier fin	-	20%
Gravier moyen	45%	25%
Gravier gros	-	30%

Selon cette classification, un zoning initial, constitué de quatre champs homogènes a été généré, dont les valeurs s'échelonnent entre 6% et 25%. Une valeur moyenne de 15% a été appliquée à l'ensemble de l'aquifère, et qui a été ajustée au cours des opérations du calage.

La recharge : En régime transitoire, la recharge de la nappe aux différentes périodes de simulations a été calculée en utilisant le même coefficient d'infiltration (5%), adopté en régime permanent (ABHGZR, 2011 ; El Kayssi et al., 2016) et tient en compte la moyenne pluviométrique de chaque période de simulation de 1980 à 2008 (Tableau 39).

Tableau 39. Recharge et moyennes pluviométriques par périodes de simulation

Période	1980-1985	1985-1990	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2008
Pluie moyenne (mm)	129.33	180.53	180.01	190.53	145.37	316.10
Recharge (Mm ³ /an)	0.71	0.99	0.99	1.05	0.80	1.74

La tendance générale, qui se dégage de l'évolution de la recharge est à la hausse, implique une augmentation relativement continue des niveaux piézométriques. Ce constat n'est pas généralisé sur l'ensemble de la nappe où certains endroits seront asséchés rapidement même relativement à des périodes de sécheresses successives, c'est le cas des zones frontières de la nappe.

Prélèvements par pompage : Les prélèvements par pompage correspondent aux forages de l'Office National de l'Eau Potable (P.722/39 et P.674/39) qui sont introduits ponctuellement dans le modèle (Figure 100).

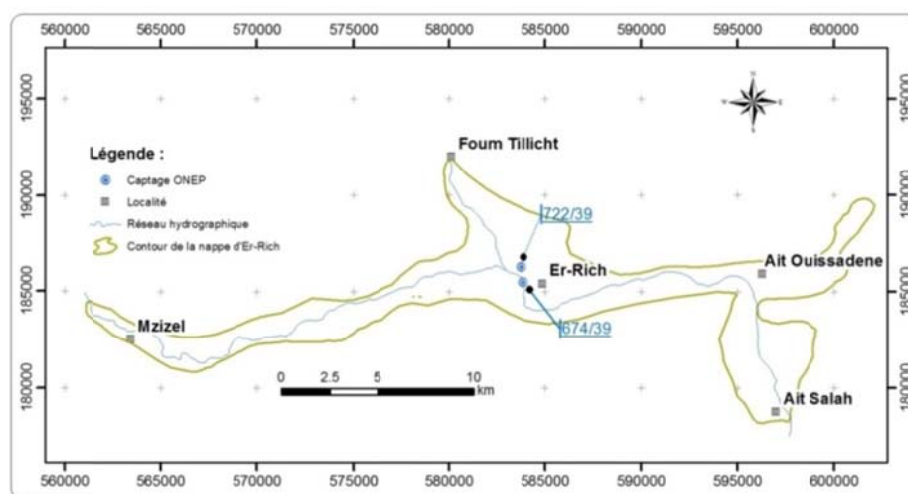


Figure 100 : Situation des captages ONEP dans la nappe de Rich

Ces points d'eau sont sous forme de deux puits captant les alluvions de la nappe de Rich sur une profondeur entre 9 et 26m, leurs débits contrastés (15 et 61l/s) attestent une forte hétérogénéité du système aquifère. Le *Tableau 40* représente les débits annuels recueillis de ces deux puits depuis leur mise en service. Les autres puits inventoriés dans la zone sont dans l'ensemble traditionnels et ne sont pas équipés de pompes électriques.

Tableau 40. Débits en m³/j sur les forages gérés par l'Office National de l'Eau Potable

Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
P.722/39	arrêté	arrêté	arrêté	arrêté	arrêté	arrêté	45956	380299
P.674/39	511362	504505	490250	513548	596070	582231	545464	204333

Retour des eaux d'irrigation : il représente l'évolution des volumes d'eaux d'irrigation à partir des eaux de surface qui sont infiltrées dans la nappe durant la période 1980 - 2008. Ces volumes d'eau sont calculés en adoptant un coefficient de ré-infiltration de 20%, adopté à l'irrigation gravitaire dans la zone (ABHGZR, 2011). Les volumes d'eaux théoriques infiltrées sont variables de 0.1Mm³ à 0.7Mm³.

5.4.1.2 Calage du Modèle

Le calage consiste à simuler le rabattement de la nappe, en réglant itérativement la distribution de la porosité efficace et les termes du bilan correspondant aux infiltrations, au drainage et aux prélèvements jusqu'à l'obtention d'une bonne concordance entre la piézométrie observée et calculée. L'intégration des nouvelles données d'entrée a été effectuée sur la période allant de 1980 à 2008 avec un pas de calcul annuel. L'absence de données consistantes a conduit à subdiviser cette durée en 6

périodes appelées en terminologie de MODFLOW « stress periods » : 5 périodes avec un pas de 5 ans entre 1980 et 2005 et une période avec un pas de 3 ans entre 2005 et 2008. Afin d'évaluer la qualité du calage, on s'est basé sur l'historique de quatre puits témoins dont le régime saisonnier est assez bien connu (Tableau 41).

Tableau 41. Points de surveillance choisis pour le calage du modèle en régime transitoire

Piézomètre	X (m)	Y (m)	Z (m)	Date de mise en service	Période d'observation disponible
582/39	595600	181550	1239	1980	1980-2008
588/39	596650	185100	1256	1980	1980-2008
592/39	592500	186100	1280	1980	1980-2008
1195/48	596950	178600	1227	1980	1980-2008

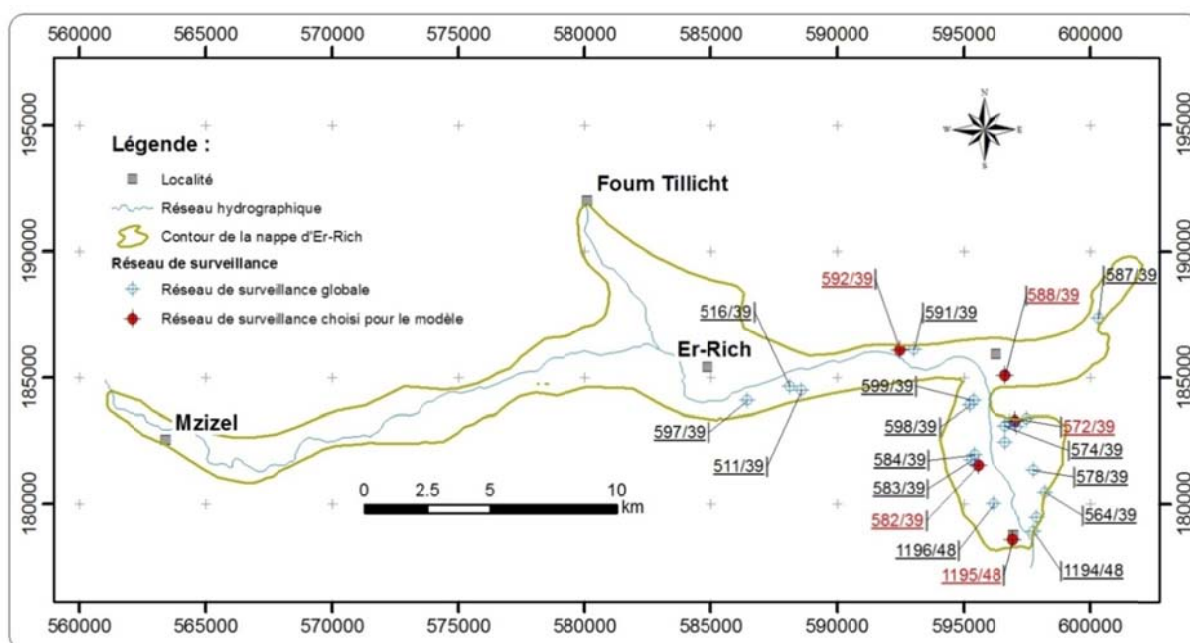


Figure 101 : Situation du réseau de surveillance de la nappe de Rich

Le réseau de surveillance est relativement représentatif au moins dans la moitié orientale de la nappe, avec une densité importante. Sa mise en service depuis les années 1980 permet d'affiner très bien le calage du modèle par comparaison avec la piézométrie observée.

Les courbes de la Figure 102 représentent l'évolution de la piézométrie calculée et mesurée au cours des périodes de simulations. Leur analyse montre une concordance entre les chroniques calculées et mesurées, ce qui indique un calage satisfaisant et un modèle qui peut servir à des simulations prévisionnelles.

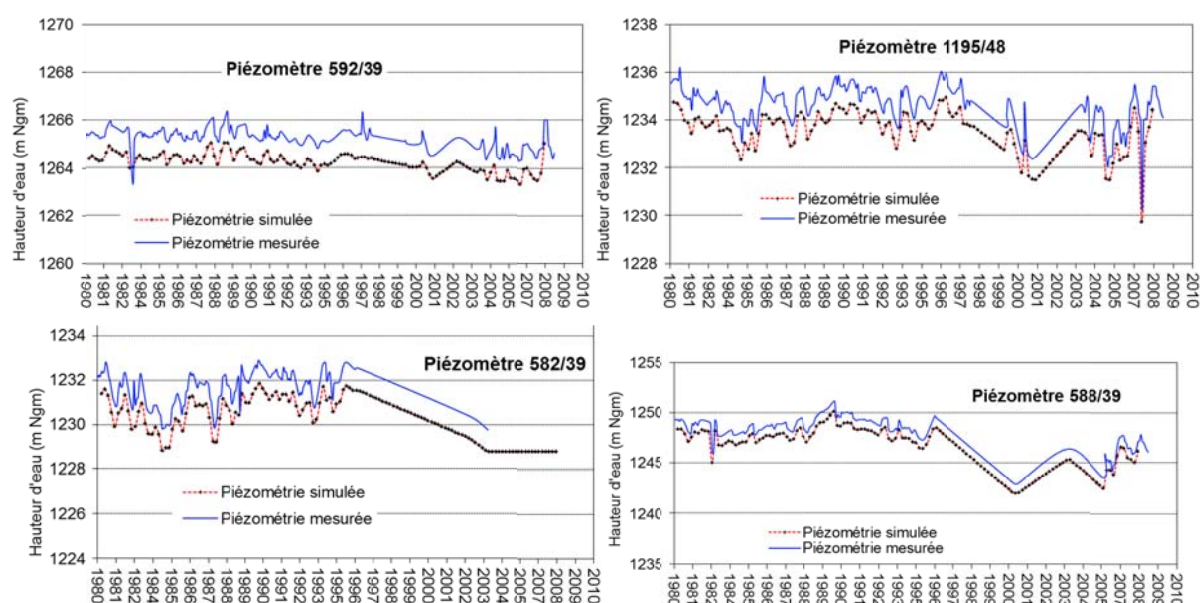


Figure 102 : Comparaison des niveaux piézométriques mesurés et calculés dans quelques puits témoins

5.4.2 Résultats et discussions

5.4.2.1 Répartition spatiale de la porosité efficace

Plusieurs simulations en régime transitoire ont été réalisées pour affiner la distribution du coefficient d'emménagement (S_s) et pour tester la sensibilité du modèle. Les valeurs calibrées se situent entre 5% et 25%, avec une moyenne de 12% (Figure 103). La valeur de S_s dans les zones frontières de la nappe correspond approximativement à celle rapportée par Chamayou et al. (1975) pour l'aquifère de Ternata plus au Sud qui se caractérise par l'abondance des dépôts de déjections et des éboulis aux pieds des falaises environnantes, mais les zones de transition de la nappe de Rich sont nettement supérieures à leurs résultats. Cependant, Zume et Tarhule (2011) ont signalé des valeurs de S_s allant jusqu'à 20% pour des aquifères similaires au Sud des Etats Unis, ce qui est raisonnablement proche de la valeur supérieure de S_s obtenue dans cette étude. Dans l'ensemble, les coefficients d'emménagement simulés ont été conformes aux conditions observées, les valeurs de S_s obtenues pour l'aquifère de Rich ont une évolution décroissante des zones frontières aux zones centrales. Cela se compare favorablement aux valeurs rapportées par Davis et Christenson (1981). Cette évolution décroissante est liée aux dépôts qui, d'abord grossiers et sableux proches des lits actuels des cours d'eau, deviennent ensuite plus fins en se rapprochant des rides anticlinales avoisinantes. Cette loi de diminution est troublée par une certaine discontinuité où les cônes de déjection avoisinants s'alternent avec les dépôts graveleux.

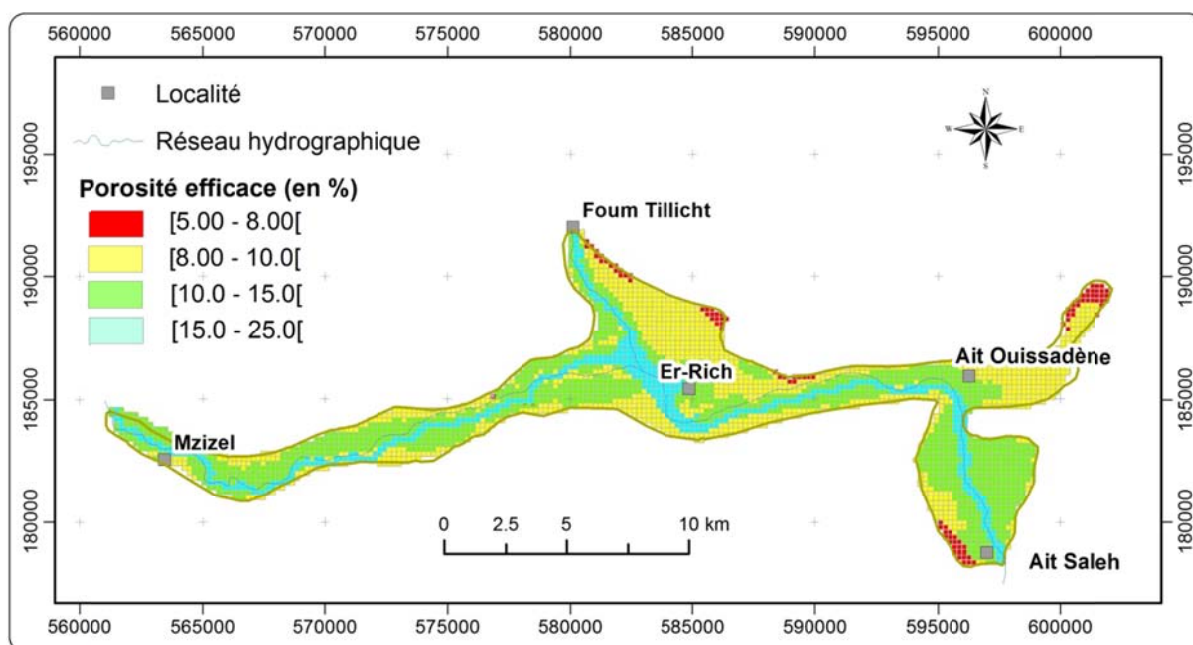


Figure 103 : Répartition de la porosité efficace issue du calage

5.4.2.2 Régime de la nappe

Le régime de la nappe est suivi depuis 38 ans, grâce à l'observation mensuelle d'un réseau de puits-témoins et de piézomètres. Le régime annuel des fluctuations piézométriques paraît assez régulier; les amplitudes annuelles varient entre 0.5 et 1.5 m et croissent en se rapprochant aux fronts de la nappe (2 à 3.5 m par an). Cependant, la variation piézométrique globale entre le début et la fin de la simulation, montre une baisse piézométrique remarquable au droit du centre de Rich avec un inversement local du sens d'écoulement. Ailleurs, l'allure des courbes isopièzes reste relativement stable (Figure 104). La baisse piézométrique locale se coïncide avec la zone la plus sollicitée de la nappe, où les prélèvements par pompage des forages de l'Office National de l'Eau Potable ont créé une zone dépressionnaire de quelques dizaines d'hectares. Dans le reste de la nappe, les courbes isopièzes sont relativement stables.

En ce qui concerne le régime interannuel de la nappe, on note un décalage de deux années dans le temps entre l'humidité relative d'une année donnée et les variations piézométriques de la nappe. Ainsi à l'année sèche de 1981-82 marquée par l'absence de crues, a succédé en 1984 un étiage marqué de la nappe ; inversement à la suite des crues exceptionnelles de Ziz de novembre 2002, il a été observé des remontées piézométriques spectaculaires entre novembre 2003 et février 2004, manifestées par des affleurements de la nappe en plusieurs secteurs. L'infiltration des eaux de crues dans les oueds

apparaît donc comme le principal facteur de recharge. Des études réalisées sur des aquifères alluviaux du Nord-Est brésilien (Santiago et al., 2001 ; Montenegro et al., 2003) et d'autres régions semi-arides (Rains et Mount, 2002) ont mis en évidence un mécanisme similaire de recharge à partir des lits des cours d'eau pour les zones de la nappe situées à moins de 500 m de la rivière.

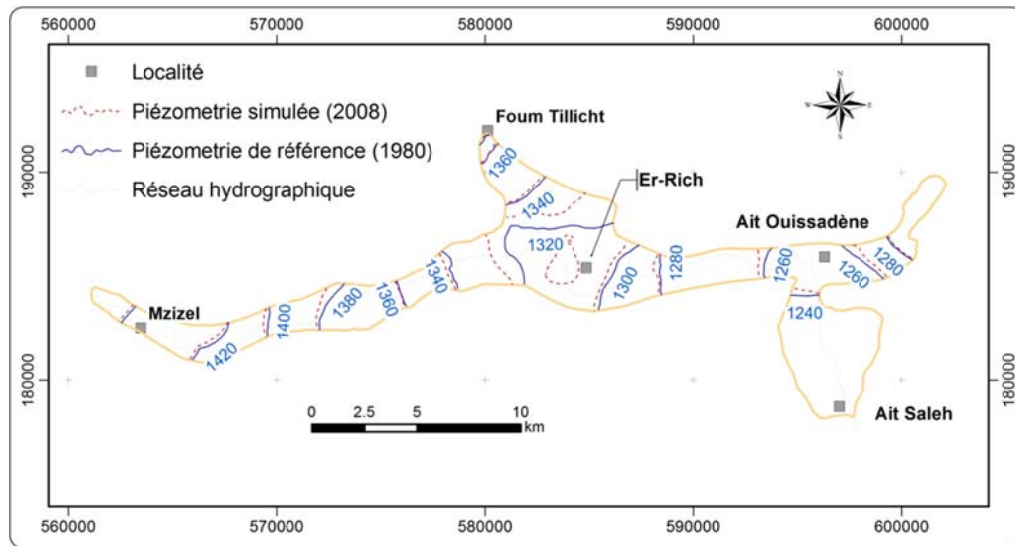


Figure 104 : Comparaison des niveaux piézométriques simulés (état de référence 1980 et état de 2008)

Contrairement au régime pluviométrique irrégulier de la zone qui donne naissance à des crues discontinues (ABHGZR, 2011), les eaux superficielles fournissent un débit de base continu à l'aquifère qui maintient son niveau pendant les sécheresses. Dans son cours, l'oued Sidi Hamza est presque partout pérenne en raison des apports de la source de Sidi Hamza, captant le réservoir profond liasique et ayant un débit annuel moyen de 1190l/s.

L'analyse des fluctuations de la nappe vis-à-vis des apports de cette source, montre l'existence d'une relative concordance entre les deux avec une certaine irrégularité (Figure 105).

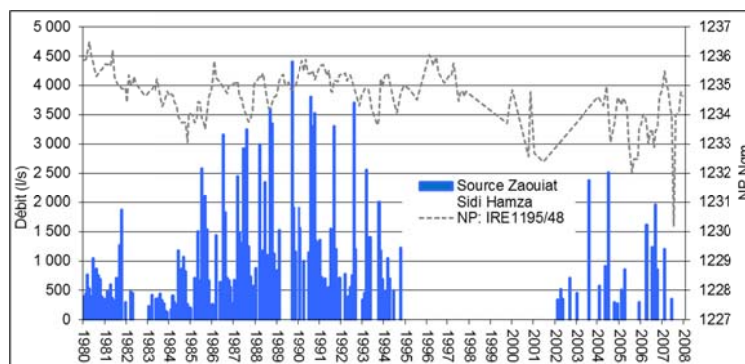


Figure 105 : Comparaison des niveaux piézométriques et des débits de la source de Sidi Hamza

5.4.2.3 Bilans obtenus par le modèle

Le modèle calé en transitoire a fait l'objet d'une première phase d'exploitation ce qui a permis la quantification des termes du bilan et la détermination des zones d'entrées/sorties (tableau suivant). Il montre que la nappe est relativement en état d'équilibre depuis 1980 même en périodes de sécheresses prolongées et que la recharge directe par les cours d'eau est l'apport principal de l'aquifère (55 – 67%). Des études réalisées sur des aquifères alluviaux du Nord-Est brésilien (Santiago et al., 2001 ; Montenegro et al., 2003) et d'autres régions semi-arides (Rains et Mount, 2002) ont mis en évidence un mécanisme similaire d'alimentation à partir des lits des cours d'eau. Les eaux de pluie contribuent également à la recharge de la nappe, mais n'ont joué qu'un rôle mineur la plupart des années. Pour les sorties de la nappe, les prélèvements par pompages représentent en moyenne 56% des outputs. Le drainage par les oueds constitue également une sortie principale de l'aquifère (43% en moyenne).

Ces résultats correspondent à ceux rapportés par l'ABHGZR (2011) pour cet aquifère et ceux obtenus pour des aquifères similaires dans le Haut Atlas et la plaine de Tafilalt (Wolf et Margat, 1961), même si les volumes d'eau indiqués sont probablement légèrement différents de ceux de cette région.

Les résultats ci-dessus suggèrent que la variabilité climatique naturelle qui modifie la quantité et le moment des précipitations, n'a pas d'impact direct sur la recharge de l'aquifère et, de la même manière, la contribution du débit de base aux cours d'eau. Le caractère irrégulier de l'écoulement du Ziz et de Sidi Hamza est compensé par les apports des sources amont qui constituent les principaux exutoires des nappes profondes liasiques et qui jouent le rôle d'un système régulateur du système.

Tableau 42. Bilan hydrique de la nappe alluviale de Rich en régime transitoire

Termes de bilan en Mm3	(1) 1980-1985	(2) 1985-1990	(3) 1990-1995	(4) 1995-2000	(5) 2000-2005	(6) 2005-2008
ENTREES :						
Variation des réserves (stockage)	1.8	0.46	0.36	0.38	1.73	1.89
Apports des cours d'eau	3.66	3.9	3.93	3.96	3.89	4.15
Recharge par les précipitations	0.8	1.17	1.17	0.96	0.69	0.69
Retour des eaux d'irrigation	0.1	0.3	0.6	0.6	0.7	0.7
Total des entrées	6.36	5.83	6.06	5.9	7.01	7.43
SORTIES :						
Variation des réserves (déstockage)	0.45	0.07	0.11	0.03	0	0.07
Drainage des cours d'eau	5.83	5.45	5.35	5.27	3.56	3.42
Prélèvements par pompage	0	0	0	0	4.89	5.4
Total des sorties	6.28	5.52	5.46	5.3	8.45	8.89
ENTREES - SORTIES	-0.08	-0.31	-0.6	-0.6	1.44	1.46

5.5 Cartographie de la vulnérabilité à la pollution

5.5.1 Introduction

Les eaux souterraines représentent la principale ressource en eau dans les zones semi-arides et sont souvent menacées par les activités humaines (Baali et al., 2007). L'usage de plus en plus important d'engrais chimiques dans les terres agricoles et l'augmentation des rejets domestiques et industriels les rendent encore plus vulnérables (Mohammadi et al., 2009). La notion de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution intègre les différents facteurs physiques qui déterminent dans les conditions naturelles, la sensibilité de ces nappes à la pollution à partir de la surface du sol, (Albinet et Margat, 1975). La prévention par cartographie de ces zones sensibles constitue une étape importante, à laquelle les scientifiques consentent de plus en plus d'efforts. Les premiers travaux sur la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines remontent aux années 1970 (Margat J, 1970 ; Albinet et Margat J, 1970), ces travaux visaient à montrer les variations spatiales de la protection naturelle des aquifères et identifiaient les zones où des mesures de protection doivent être envisagées, (Lallemant-Barres, 1994), (Robins, 1996). De nombreuses méthodes d'évaluation de la vulnérabilité ont été développées dans le monde (Stiger et al., 2006). Dans cette étude, notre choix a porté sur l'application de la méthode DRASTIC dont l'usage est très répandu au monde et particulièrement au Maroc (Sinan et Razack, 2008). Cette méthode paramétrique est la plus pertinente vis-à-vis de la réalité de terrain du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Elle se présente sous forme d'un système de cotation numérique, basé sur la considération des différents facteurs influençant le système hydrogéologique.

L'application de cette méthode a été effectuée au niveau de la nappe alluviale de Rich. Ce secteur a été choisi par la diversité de l'occupation des sols et le développement urbain de plus en plus croissants.

5.5.2 Matériels et méthodes

5.5.2.1 Occupation du sol

L'occupation du sol de la zone d'étude est un paramètre important dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution. Dans notre cas, l'occupation du sol du secteur a été générée par la combinaison de plusieurs sources de données : cartes topographiques au 1/50000, cartes géologiques au 1/200000, plan d'aménagement du centre de Rich et le site web Wikimapia (<http://wikimapia.org>)

cartographiant la Terre au moyen des vues satellitaires. Les informations extraites ont été traitées et complétées sous SIG par des données de terrain. En effet, la zone d'étude est occupée par cinq types de terres (Figure 106) : forêts et zones semi-naturelles, milieux aquatiques, cultures permanentes, zones urbaines continues et discontinues, périmètres irrigués et zones d'activité, cette dernière englobe des carrières, des décharges, des parkings, des marchés hebdomadaires, des stations d'essence et des stations de trituration d'olives.

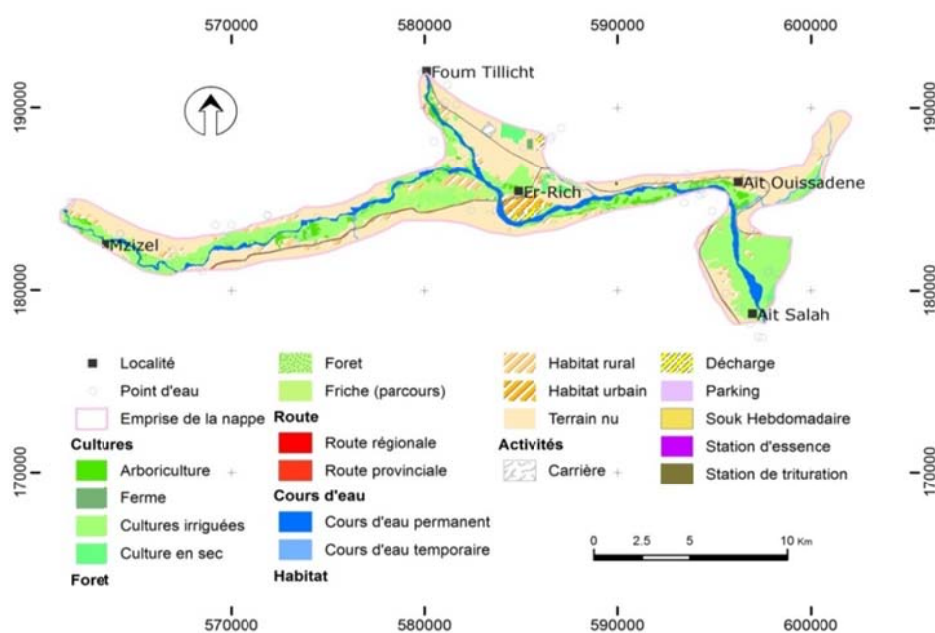


Figure 106 : Occupation du sol de la zone d'étude (Lambert Maroc Zone I)

5.5.2.2 Qualité des eaux

En absence d'autres données représentatives, la qualité des eaux de la nappe de Rich est appréciée ici par la conductivité électrique en exploitant les données de 44 puits bien réparties à l'échelle de la nappe. En effet, les concentrations de la conductivité électrique contenues dans les eaux souterraines de la nappe de Rich varient de 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 2900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs sont dans la plus part inférieure aux seuils de références selon les normes marocaines (2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et révèlent 4 classes principales : (i) la classe excellente <750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la classe bonne (750;1300), la classe moyenne (1300-2700) et la classe mauvaise (2700-2920). Cette dernière est observée en aval hydraulique du centre de Rich. D'une manière générale, les valeurs de la conductivité électrique augmentent de l'amont vers l'aval de la nappe (Figure 107).

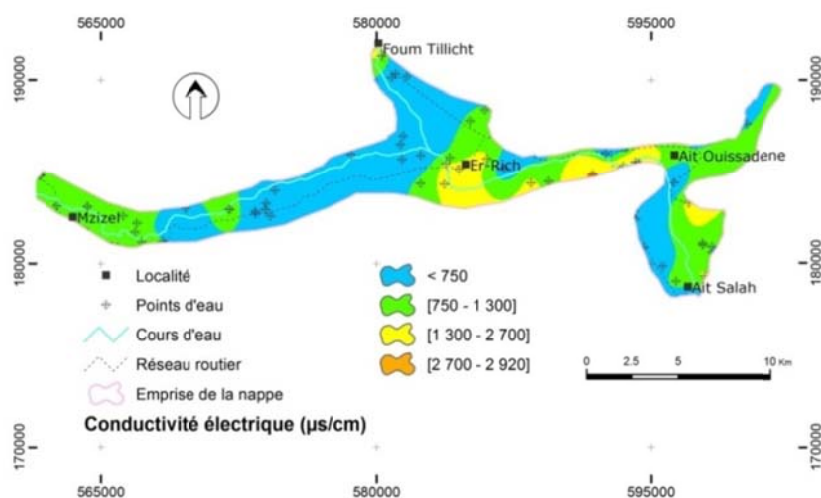


Figure 107 : Conductivité électrique de la nappe de Rich (Lambert Maroc Zone I)

5.5.2.3 Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité selon l'indice DRASTIC

Il existe deux versions de la méthode DRASTIC : la version DRASTIC standard, appliquée dans le cas où les contaminants sont des polluants inorganiques (cas de notre article), et la version DRASTIC «pesticides», appliquée dans le cas où les contaminants considérés sont des pesticides. DRASTIC a été développée dans les années 1980 par les services de l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (USEPA), (Aller et al., 1987). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque verticale à la pollution des aquifères par systèmes paramétriques. Elle a fait l'objet de plusieurs travaux : (Khosravi et al., 2018) l'ont utilisée pour étudier l'aquifère de Sari-Behshahr à Iran ; (Allouche et al., 2017), l'ont testée dans la cote est tunisienne ; (Hamza et al., 2007) l'ont adoptée pour évaluer la vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique de Metline–Ras Jebel–Raf Raf au Nord-Est tunisien; (Hamza M et al., 2008) l'ont utilisée pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltine-Ras Jebel-Raf Raf au Nord-Est tunisien; (Bentekhici N et al., 2018) l'ont utilisée pour l'évaluation des risques de la pollution des eaux et vulnérabilité de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbès au nord-ouest algérien. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de cette méthode pour délimiter les zones à risque et vulnérables à la pollution, quelle que soit son origine.

La méthode DRASTIC est un modèle qui repose sur une analyse spatiale classique. L'acronyme DRASTIC correspond aux initiales de sept facteurs déterminant la valeur de l'indice de vulnérabilité : la profondeur de la nappe (D) ; la recharge efficace (R) ; les matériaux de l'aquifère (A) ; le type de sol (S) ; la topographie ou la pente (T) ; l'impact de la zone vadose ou zone aérée (I) et la

perméabilité ou la conductivité hydraulique de l'aquifère (C). Chacun de ces paramètres est subdivisé en classes, indexés des cotes variant de 1 à 10 et attribués un poids numérique comprise entre 1 et 5 en fonction de son degré d'influence et des conditions hydrogéologiques locales (Tableau 43). Les valeurs des poids et des cotes utilisées sont celles de la version standard de la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987).

Tableau 43. Scores et poids des paramètres DRASTIC (Aller et al., 1987)

Paramètre	Facteurs (Poids)	Classe	Score
Profondeur de l'eau	D (W:5)	0-2	10
		2-4	9
		4-6	8
		6-8	7
		8-11	6
		11-14	5
		14-18	4
		18-25	3
		25-33	2
		>33	1
Recharge nette	R (W:4)	2-5	1
		5-10	3
		10-15	6
Lithologie de l'aquifère	A (W:3)	Sols de Sebkhat	1
		Argiles sableuses	2
		Sable argileux	4
		Sables	6
		Grès	7
		Graviers	9
Type de sol	S (W:2)	Zone urbaine	1
		Sols complexes	2
		Sols hydromorphes et allomorphes	3
		Sol isohumique	4
		Sol peu évolué et vertisols	5
		Sol gypseux	6
		Sols brun calcaire	7
		Rendzine	8
Pente	T (W:1)	Sol minéral et lits des oueds	9
		>25	1
		17-25	2
		12-17	4
		10-12	5
		8-10	7
		6-8	8
		3-6	9
Lithologie de la zone non saturée	I (W:5)	0-3	10
		Sols de Sebkhat	2
		Limons	3
		Argiles, sables et limons	4
		Argiles-graviers	7
Conductivité hydraulique	C (W:3)	Graviers et sables	9
		0-5	1
		5-10	3
		10-15	5
		15-25	7
		>25	8

L'indice de vulnérabilité (IDRASTIC) est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants :

$$IDRASTIC = (Dw \times Dr) + (Rw \times Rr) + (Aw \times Ar) + (Sw \times Sr) + (Tw \times Tr) + (Iw \times Ir) + (Cw \times Cr) \quad (5.2)$$

Où D, R, A, S, T, I, et C sont les sept paramètres de la méthode DRASTIC, w étant le poids du paramètre et, r la cote associée.

L'indice IDRASTIC est représenté par une valeur numérique variant de 23 à 226; il exprime le degré de vulnérabilité. Plus cette valeur est élevée, plus la vulnérabilité à la pollution est grande. Pour établir la carte de vulnérabilité à la pollution de la zone d'étude, le classement proposé par (Aller et al., 1987) a été adopté et qui est présenté sur le Tableau 44.

Tableau 44. Critères d'évaluation de la vulnérabilité DRASTIC (Aller et al., 1987)

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Vulnérabilité minimum	23 – 80
Vulnérabilité très faibles	80 – 100
Vulnérabilité faible	100 – 120
Vulnérabilité moyennement faible	120 – 140
Vulnérabilité moyennement forte	140 – 160
Vulnérabilité forte	160 – 180
Vulnérabilité très forte	180 – 200
Vulnérabilité maximum	200 – 226

5.5.2.4 Préparation des données du modèle DRASTIC

L'évaluation des différents paramètres considérés dans la méthode DRASTIC requièrent une bonne connaissance du milieu naturel. Toutes les couches de données requises ont été préparées dans un GIS. Le détail de chaque couche thématique est décrit ci-dessous :

1) Profondeur du plan d'eau « D »

Elle représente toute l'épaisseur des horizons traversés par un polluant pour atteindre la nappe. Ce paramètre contrôle le degré d'interaction entre les matériaux et le contaminant et par conséquent la possibilité d'atténuation d'une telle contamination. Afin d'établir la carte des profondeurs du plan d'eau, les données 44 puits (état d'avril 2012) ont été utilisées pour interpoler la profondeur de la nappe phréatique en utilisant la méthode IDW (Inverse Distance Weighted), il s'agit d'une méthode rapide, facile à calculer et simple à interpréter (Lu G Y et Wong D W, 2008).

Ensuite, la profondeur a été divisée en 10 intervalles (Figure 108): <2 ; 2-4 ; 4-6 ; 6-8 ; 8-11 ; 11-14 ; 14-18 ; 18-25 ; 25-33 et >33 en se basant sur la classification de (Aller et al., 1987). La carte obtenue est illustrée sur la figure suivante.

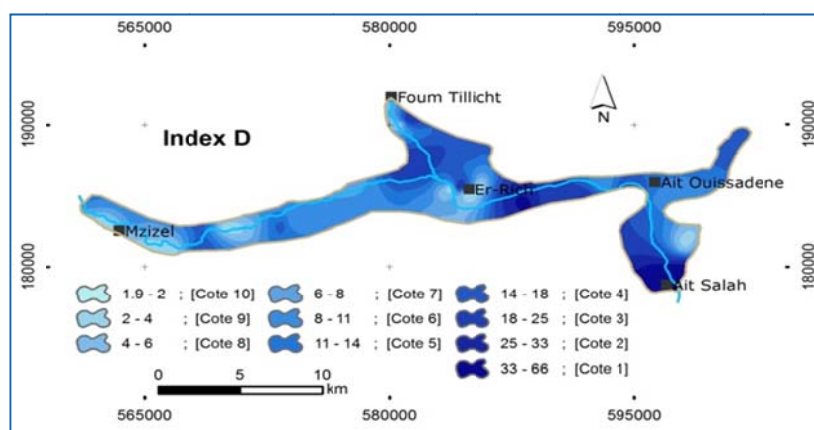


Figure 108 : Profondeur du plan d'eau de la nappe de Rich

2) Recharge nette « R »

La recharge nette définit la quantité d'eau qui atteint l'aquifère. Le taux d'infiltration de cette fraction d'eau guide le transport des contaminants dans le sol jusqu'à la zone saturée.

Au niveau de la nappe alluviale de Rich, la recharge se fait essentiellement par l'infiltration des eaux de crues avec un taux de 67% des entrées de la nappe et par infiltration des eaux des précipitations avec un taux de 33% (El kayssi et al., 2016). La recharge par retour des eaux d'irrigation est considérée négligeable, du fait que le système d'irrigation adopté est traditionnel (seguias et canaux de déviation pendant les périodes des crues) et l'absence de mesures des volumes d'eau consommés par les parcelles agricoles.

La recharge par infiltration des eaux de pluie a été calculée en se basant sur la carte des isohyètes des moyennes interannuelles de la période (1957-2003) et sur un coefficient d'infiltration de 5% (ABHGZR, 2011). La fraction infiltrée est de 2,27 Mm³ (El kayssi et al., 2016).

La recharge par infiltration dans le lit des oueds concerne l'infiltration des eaux de crues ; Les débits des oueds Ziz et Sidi Hamza sont contrôlés à l'entrée de la nappe, respectivement, par les stations d'Amouguer M'Zizel et de Foug Tillicht. Un coefficient de 4% est appliqué aux apports moyens des cours d'eau à leur entrée à la nappe (El kayssi et al., 2016). Ce coefficient est moins important que celui relatif aux précipitations du fait que les vitesses des eaux de crues sont plus élevées. Cette

recharge est répartie tout le long des lits des oueds avec un volume calculé de 4,5 Mm³ (El kayssi, 2016).

Ainsi, à partir des valeurs de la recharge nette calculée, il a été possible d'établir la répartition spatiale de ce paramètre. Dans la zone d'étude deux classes de recharge nette ont été définies, montrant la variation spatiale de ce paramètre. Ensuite, la recharge a été divisée en 2 intervalles : [5 – 10[et [10 – 15[en se basant sur la classification de (Aller et al., 1987). La carte obtenue est illustrée sur la Figure 109.

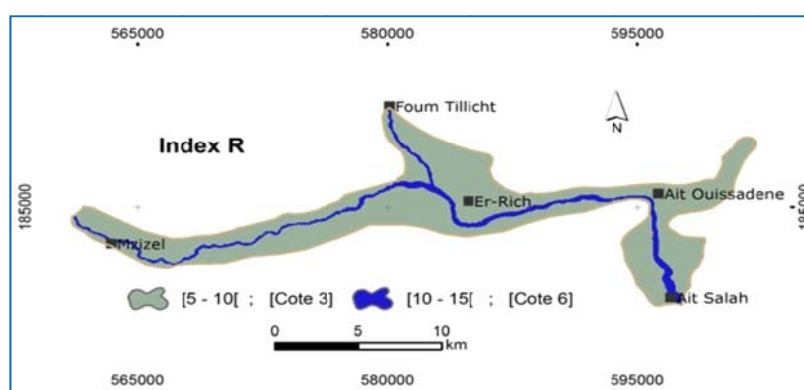


Figure 109 : Recharge nette (R) de la nappe de Rich

3) *Le milieu aquifère (A) et la zone non saturée (I)*

Pour décrire la nature lithologique de la zone saturée et non saturée de la nappe de Rich, les données de 55 coupes lithologiques ayant traversés complètement la nappe ont été compilées, les feuilles géologiques couvrant la nappe et les coupes géologiques établies par (Ait Addi, 1994, 1999), et (El Kochri, 1996). Les profondeurs totales des forages sélectionnés varient entre 6m et 50m. La distinction entre la zone saturée et non saturée a été faite en tenant compte le niveau de la nappe mesuré en 2012 (Figure 110).

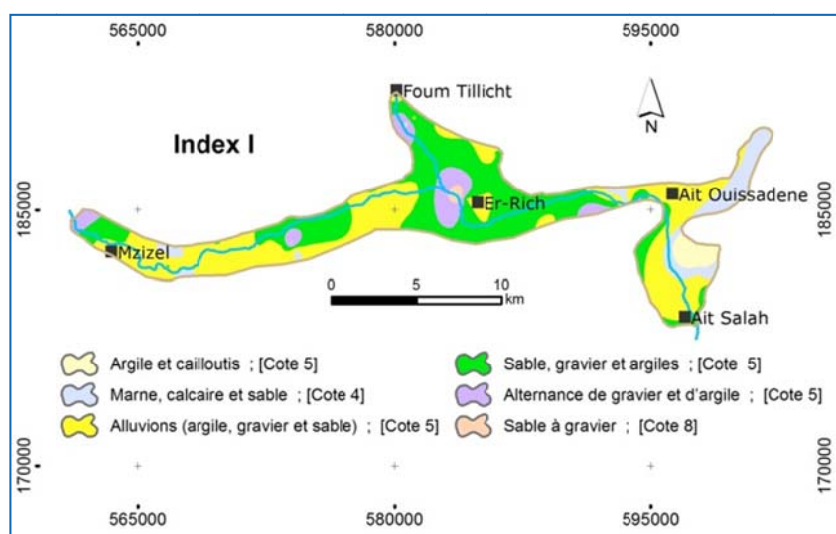


Figure 110 : Carte de la zone saturée (I) de la nappe de Rich

Devant le nombre important et la diversité des descriptions lithologiques retrouvées et pour des raisons de simplification, 13 faciès lithologiques principaux ont été utilisés, groupés en 3 classes majeures pour la zone non saturée et en 5 classes majeures pour la zone saturée. Ensuite, à chaque faciès lithologique sa note correspondante est attribuée. Le milieu aquifère (A) et la zone non saturée (I) ont été par la suite divisés chacun en 6 et en intervalles en se basant sur la classification de (Aller et al., 1987). Les cartes correspondantes sont présentées sur la Figure 111.

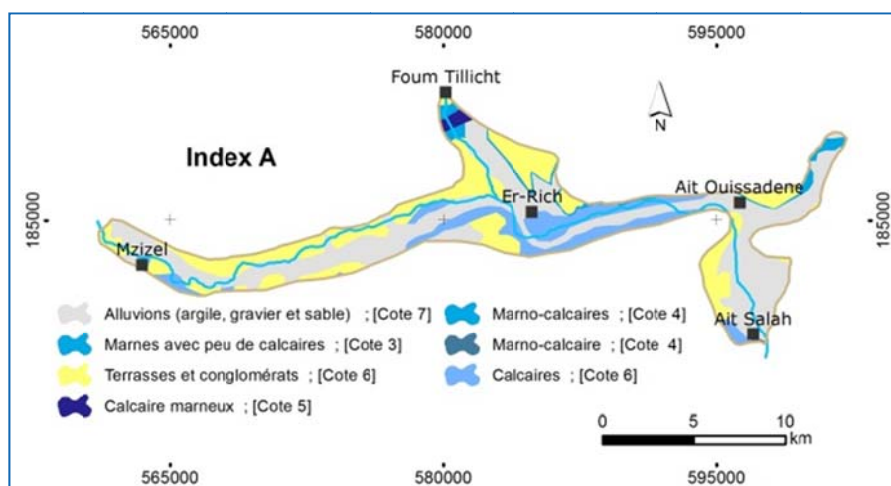


Figure 111 : Carte du milieu aquifère (A) de la nappe de Rich

4) Type de sol (S)

L'absence d'une carte du sol couvrant le périmètre de la nappe de Rich, oriente la réflexion vers l'exploitation des données des coupes lithologiques des sondages mécaniques disponibles, au nombre

de 40, notamment la description du premier niveau traversé. Les informations acquises ont été compilées avec les données des feuilles géologiques de Rich et de Gourrama. L'information compilée a permis d'effectuer un zoning constitué de 3 classes principales : classe 1) constituée de limons argileux, couvrants notamment les terres cultivables et les périmètres irrigués ; Classe 2) constituée de cailloutis argilo-limoneux, couvrants les terres nues en bas des talus qui constituent les éboulis et les dépôts des cônes de déjections ; Classe 3) constituée essentiellement de matériel alluvionnaires (galets, graviers et sables), il s'agit des lits des cours d'eau et leurs plaines alluviales immédiates.

Ensuite, ces classes ont été reconverties en 3 intervalles (Figure 112) en se basant sur la classification de (Aller et al., 1987). La carte obtenue est illustrée sur la Figure 112.

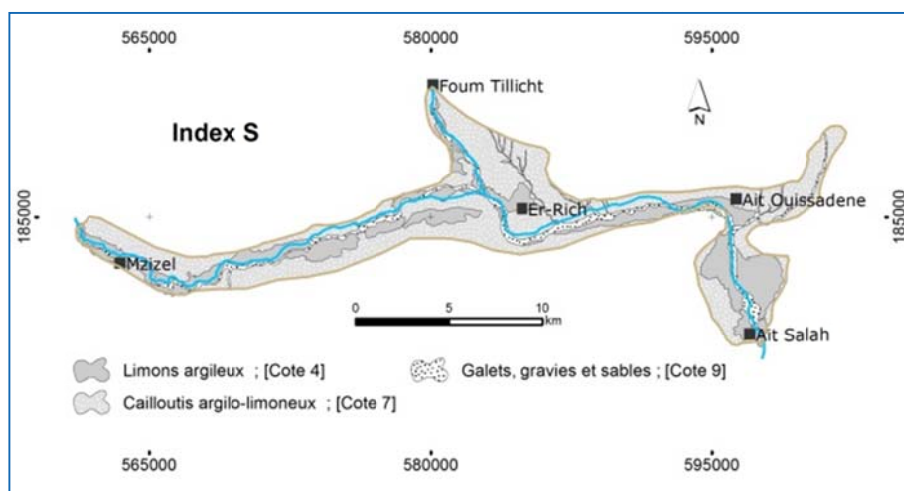


Figure 112 : Carte du type de sol (S) de la nappe de Rich

5) La Topographie (T)

La topographie affecte également l'infiltration à la surface du sol. Une pente forte favorise le ruissellement des eaux superficielles et par conséquent une faible contamination des eaux souterraines. Par contre, une pente faible a une tendance à retenir l'eau pendant une période longue et de ce fait, un plus grand potentiel de migration des contaminants vers la nappe sous-jacente. Les pentes de la nappe alluviale de Rich ont été calculées en utilisant DEM, issues des données du Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), version 4, disponibles en téléchargement libre de droit à l'adresse : <http://srtm.csi.cgiar.org/>. Le calcul des pentes a été fait en utilisant l'outil slope de l'extension 3D Analyst d'ArcGis 10.1. Les pentes générées ont été ensuite classées en 8 classes (0–3

; 3–6 ; 6–8 ; 8–10 ; 10–12 ; 12–17 ; 17–25 ; >25) en se basant sur la classification de (Aller et al., 1987). Le résultat obtenu est représenté dans la Figure 113.

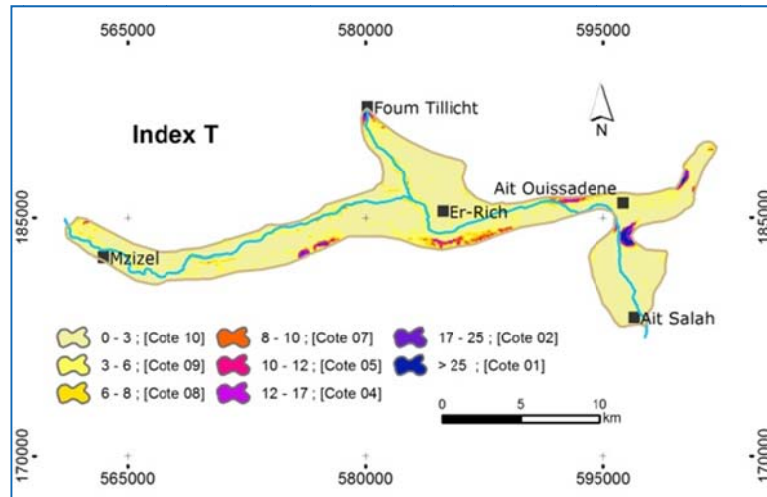


Figure 113 : Carte de la Topographie (T) de la nappe de Rich

6) Conductivité hydraulique « C »

La conductivité hydraulique d'un aquifère décrit la capacité d'un milieu aquifère (sol et roche) à transmettre de l'eau à travers des espaces de pores ou des fractures et joue un rôle important dans la vitesse et la dispersion de la migration des polluants. La conductivité hydraulique (K) de la nappe de Rich est déduite du modèle calé en permanent par (El Kayssi et al., 2016) qui représente le seul travail de ce genre dans la zone d'étude. Le calage du modèle a montré une hétérogénéité importante en terme de perméabilité conformément avec la lithologie du réservoir aquifère, allant des alluvions grossiers jusqu'à des dépôts fluvio-lacustres marneux ou gréseux. Les perméabilités reconstituées par le modèle varient entre 10-6 et 10-2m/s. Ces valeurs sont ensuite subdivisées en 4 classes conformément à la classification de (Aller et al., 1987). La carte obtenue est illustrée sur la Figure 114.

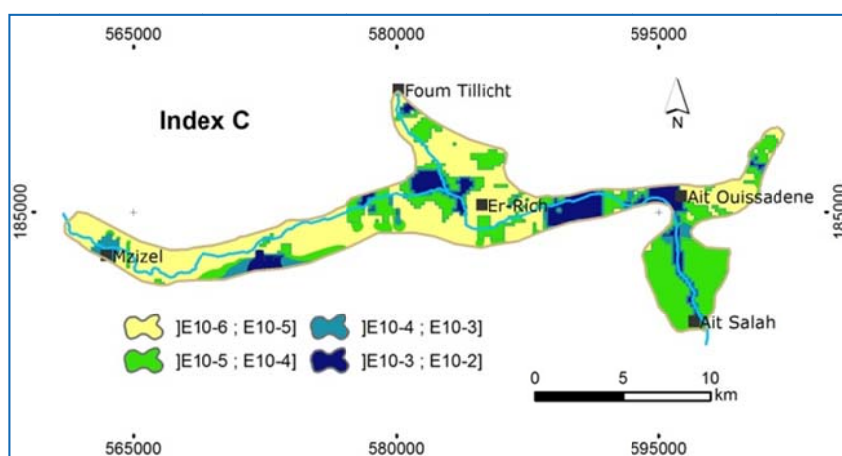


Figure 114 : Carte de la conductivité hydraulique « C » de la nappe de Rich

5.5.2.5 Validation de la carte de vulnérabilité à la pollution par la conductivité électrique

En absence de données représentatives sur les concentrations des nitrates dans les eaux souterraines de la nappe de Rich (analyse irrégulière des eaux d'un seul puits), la carte de vulnérabilité obtenue est testée et validée par la conductivité électrique de 44 puits via un test de conformité, qui permet de vérifier la concordance des classes de vulnérabilité obtenues. Cette concordance a été établie par le calcul du coefficient de Kappa (K), qui est un coefficient destiné à mesurer l'accord entre deux variables qualitatives ayant les mêmes modalités (Cohen, 1960). Le coefficient Kappa se calcule en appliquant la formule ci-dessous (avec P_0 : proportion d'accord observée et P_e : proportion de cas où, selon la théorie des probabilités, on peut s'attendre à un accord simplement dû au hasard):

$$K = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e}$$

Plus ce rapport est proche de 1, et plus l'écart entre la proportion d'accords observée et la proportion théorique d'accords « aléatoires », se rapproche de l'écart entre l'accord parfait des deux observateurs et leur concordance aléatoire. Une échelle d'interprétation de Kappa a été proposée par (Bernard, 1993). Elle détermine le taux d'accord en fonction de la valeur observée de Kappa (Tableau 45).

Tableau 45. Échelle d'interprétation de Kappa K (Bernard, 1993)

Valeurs observées de Kappa	Interprétation
< 0	Accord quasi-inexistant
0 - 0,20	Faible accord
0,21 - 0,40	Accord passable
0,41 - 0,60	Accord modéré
0,61 - 0,80	Accord important
0,81 - 1,00	Accord presque parfait

5.5.3 Résultats et discussions

5.5.3.1 Carte de vulnérabilité à la pollution selon DRASTIC standard

L'indice de vulnérabilité DRASTIC a été calculé après l'intégration des sept couches de données à l'aide d'un SIG, conformément à l'équation (1).

Sur la base du tableau de coïncidence (Tableau 46), le coefficient de Kappa pour 44 échantillons, une proportion d'accord observée égale à 0,21 et une proportion théorique d'accord aléatoire égal à 0,24 a donné une valeur très faible de 0,006 pour la carte de vulnérabilité DRASTIC. En se référant à l'échelle d'interprétation de Kappa, il correspond à un accord faible pour les indices de vulnérabilités obtenus. Ce résultat s'apparente à celui obtenu par (Saouini et al., 2014) dans la nappe de R'Mel au nord du Maroc ($k=0,12$) dans un contexte différent et diffère à celui obtenu par (Uhan et al., 2011) dans un contexte similaire (nappe alluviale à climat semi-aride) dans la basse vallée de Savinja (Slovenia) : ($k = 0,87$).

Tableau 46. Coïncidence entre les indices de vulnérabilités DRASTIC et PRK et les conductivités électriques

Méthode	Degré de vulnérabilité	Concentration en conductivité électrique CE ($\mu\text{s/cm}$)			
		Nbr de valeur de CE <750	Nbr de valeur de CE [750-1300[	Nbr de valeur de CE [1300-2700[	Nbr de valeur de CE [2700-3000[
DRASTIC	Minimum	0	0	0	0
	Très faible	2	3	2	1
	Faible	5	6	2	0
	Moyennement faible	2	6	3	0
	Moyennement forte	0	5	4	0
	Forte	1	3	1	0
	Très forte	0	0	0	0
P.R.K	Très faible	7	21	8	2
	Faible	1	2	4	1
	Moyenne	0	0	0	0
	Forte	0	1	0	0
	Très forte	0	0	0	0
	Extrême	0	2	1	0

Les valeurs de vulnérabilité résultantes comprises entre 78 et 186 (figure suivante). Selon (Aller et al., 1987), cet intervalle a été subdivisé en sept classes de vulnérabilité: minimum (78–80), très faible (80–100), faible (100–120), moyennement faible (120-140), moyennement forte (140-160), forte (160-180) et très forte (180-186). Ces classes représentent le potentiel de pollution relatif à l'aire d'étude. En termes d'étendue, 2,8% de la zone d'étude est classée comme ayant un minimum potentiel de pollution, 18,9% est classée comme ayant un potentiel de pollution très faible, 18,9% est classée comme ayant un potentiel de pollution faible, 18,9% est classée comme ayant un potentiel de pollution moyennement faible, 18,9% est classée comme ayant un potentiel de pollution moyennement forte, 17,9% est classée comme ayant un potentiel de pollution forte et 3% de la zone d'étude est classée comme ayant un potentiel de pollution très forte.

Les secteurs près du centre de Rich et à côté des localités Ait Ouissadène Foum Tillicht et M'Zizel présentent des zones de vulnérabilité moyennement fortes à fortes. Cependant, la partie centrale, Est et sud présentent une vulnérabilité moyennement faible à faible.

En outre, la carte de vulnérabilité établie (Figure 115) révèle que l'aquifère est situé sous un secteur agricole traditionnel inclut dans la catégorie de vulnérabilité moyenne à la pollution (Périmètre de moyen hydraulique). Ainsi, selon la campagne de l'ABHGZR, 2011 la concentration de la conductivité électrique (CE) la plus élevée se situait hors périmètre irrigué (Figure 106 et Figure 107), ce qui atteste que l'activité agricole n'est pas une source potentielle à la pollution dans la zone ; Cette anomalie semble provient d'une autre source de pollution où il devient nécessaire de l'identifier dans ce qui suit.

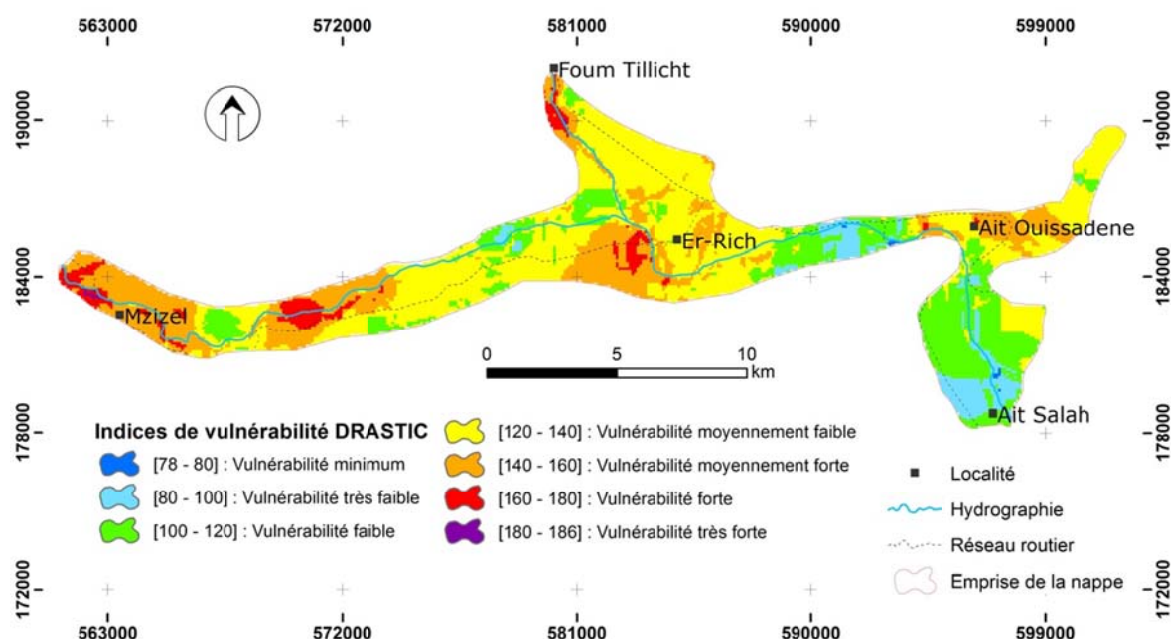


Figure 115 : Carte de vulnérabilité DRASTIC standard de la nappe de Rich, classification de (Aller et al., 1987)

5.5.3.2 Discussions

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Rich a permis d'obtenir trois grandes classes de vulnérabilité: une classe de vulnérabilité faible à très faible où la nappe semble être protégée, une classe de vulnérabilité moyenne où la nappe est sensible à une éventuelle pollution et une classe de vulnérabilité forte à très forte qui mérite une surveillance particulière. Ces caractéristiques n'excluent pas cependant, une contamination de la nappe dans les zones à faibles vulnérabilité, car un site avec un indice faible n'est pas protégé entièrement à une contamination, mais ce site est moins susceptible à la contamination par rapport à un autre site ayant un indice de vulnérabilité à la pollution élevé (Osborn et al., 1998).

Les scores élevés des paramètres DRASTIC, en particulier les scores élevés de la profondeur de l'eau, de la conductivité hydraulique et du milieu de l'aquifère sont responsables des zones à fortes vulnérabilité. Par contre les scores moyens à faibles sont le résultat de la combinaison de la zone vadose moins poreuse, de la profondeur de l'eau et de la conductivité hydraulique. En règle générale, l'indice DRASTIC augmente du sud vers le nord et le nord-ouest de la zone d'étude.

Les valeurs des indices DRASTIC obtenues ici varient de 78 à 186. Par comparaison avec les niveaux de vulnérabilité obtenus dans d'autres nappes similaires ayant des indices de vulnérabilité généralement moyennes, on peut positionner la nappe alluviale de Rich comme ayant aussi un niveau

de vulnérabilité moyen. Par exemple, les indices de vulnérabilité obtenues ici (78 à 186) s'apparentent à celles obtenues par (Allouche et al., 2017) à Sfax en Tunisie (37 à 168), par (Pacheco et al., 2015) au niveau de la nappe alluvial de Tejo et Sado au Portugal (79 à 186) et par (Abdeslama et al., 2017) au niveau de l'aquifère alluvial de Morssot El Aouinet au Nord-Est de l'Algérie (75 à 153) qui montrent en général un niveau de vulnérabilité moyen.

Les tendances de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe de Rich ont été testées par 44 mesures de la conductivité électrique (CE), dont les valeurs augmentent, globalement, du sud vers le nord et vers le nord-ouest, avec une bonne superposition entre les zones de faibles conductivité électriques et les zones où l'indice DRASTIC est faible à moyennement faible (zones assurément bien protégées). Cependant, les autres zones de moyenne à forte vulnérabilité ne se superposent pas bien avec les conductivités électriques correspondantes, ce qui minimise éventuellement la fiabilité de la carte obtenue.

La faible relation entre la carte de la vulnérabilité et celle de la conductivité électrique pourrait être expliquée soit par la faible fiabilité de la carte obtenue (indice K faible), elle pourrait aussi être expliquée par l'influence d'autres facteurs comme la minéralisation des eaux souterraines. Par définition, la conductivité électrique est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Par conséquent, elle renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau. On sait toutefois que, dans la grande majorité des eaux, le calcium et le magnésium contribuent le plus à la conductivité. En gros, 1°GH (dureté) produit une conductivité de 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à une température de 20°C (Eau du Maroc, 2017).

A l'état naturel, les travaux de (Rodier J et al., 1996) ont montré que les teneurs en calcium dans les eaux souterraines pourraient être attribuées à la dissolution de la calcite ainsi que d'autres minéraux calciques tels que le gypse. Selon (Bermond R et Vuichard R, 1973), la teneur en magnésium dans les eaux souterraines dépend de la composition des roches sédimentaires, il provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution du magnésium sous forme de carbonates et bicarbonates.

Cependant, à l'échelle de la zone d'étude, les travaux de (Nouayti N et al., 2015) ont montré que les teneurs en calcium et en magnésium dans les eaux de la nappe de Rich ont des concentrations inférieures aux valeurs maximales admissibles (N M, 2002), il s'emble donc raisonnable que la

minéralisation des eaux de la nappe de Rich provient d'autres sources génératrices, éventuellement anthropique.

L'analyse de la carte de la conductivité électrique de Rich montre que les eaux souterraines sont faiblement à moyennement minéralisées, avec des valeurs supérieures à 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les puits présentant cette forte minéralisation sont localisés entre le centre de Rich et la localité d'Ait Ouissadène (Figure 107) et ponctuellement au droit des localités rurales de Foul Tillicht et de M'Zizel.

En superposant la carte d'occupation du sol et celle de la conductivité électrique on peut remarquer facilement que les zones ayant les CE les plus élevées se coïncident avec la décharge de Rich et en aval de celle-ci, ce qui peut attribuer à une infiltration des lixiviats à travers la zone non saturée avant de rejoindre la nappe.

Selon la commune de Rich, 2019, aucune décharge contrôlée ou station d'épuration ne sont mis en place ou programmées au niveau du centre de Rich et les localités avoisinantes; Les rejets arrivent directement sur les cours d'eau sans traitement préalables.

Selon ce constat, il s'emble raisonnable que les rejets liquides et les déchets solides issus du centre de Rich et les localités avoisinantes sont les responsables de la minéralisation des eaux souterraines dans les endroits où il n'y a pas une bonne superposition entre la carte de la vulnérabilité et celle de la conductivité électrique.

L'utilisation d'une autre méthode de vulnérabilité à la pollution devienne alors nécessaire et ce afin de comparer et valider ces résultats. Pour ce faire il a été utile d'exploiter les travaux de (Dekkaki H C et al., 2016) sur la même nappe en utilisant la méthode de vulnérabilité (P.R.K). Le résultat montre que la classe de vulnérabilité dominante est « très peu vulnérable » avec 89% de la superficie totale. Le reste de la nappe est partagé entre les classes suivantes : peu vulnérable, moyennement vulnérable, très vulnérable, fortement vulnérable et extrêmement vulnérable. Cette dernière est répartie très ponctuellement autour des localités de Ait Salah, Ait Ouissadene, Foul Tillicht et de M'Zizel. La validation de cette carte par la même carte de la conductivité électrique a donnée un indice K négatif -0,013 (Accord quasi-inexistant) et un taux de coïncidence légèrement plus faible (18%) par rapport à celui obtenu pour DRASTIC, ce qui valide notre conclusion sur la fiabilité de la carte obtenue et atteste que pour les deux méthodes utilisées (DRASTIC et PRK), la conductivité électrique de l'eau souterraine de la nappe de Rich ne reflète pas son état de pollution.

En plus de ce qui est discuté ci-dessus, la complexité dans la réalisation d'une carte de vulnérabilité à la pollution selon DRASTIC au niveau de la nappe de Rich est liée aussi aux 7 facteurs hydrogéologiques de l'acronyme DRASTIC ; la plus part des paramètres d'entrées comme la recharge, la conductivité hydraulique, la profondeur de la nappe, l'impact de la zone vadose, ont été produits par interpolation, tout en générant des valeurs dans des endroits où aucune donnée n'est connue ou n'existe, cette interpolation n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles (Matheron, 1965, 1971).

La difficulté de l'application de la méthode DRASTIC provienne aussi de la variété des sources de données de chaque couche d'entrée en modélisant la réalité de terrain de façon différente, ce qui les rend souvent incompatibles (Wang et Howarth, 1994). Ainsi cette difficulté provienne aussi des limites des classes et les cotes qui sont assignées aux différents paramètres (Murat, 2000) ; les limites des classes standards ne reflètent pas souvent la réalité de la zone d'étude du fait que ces classes peuvent regrouper des entités différentes (Wang et Howarth, 1994). Dans ces conditions, l'agrégation des cotes n'est pas toujours identique à celle définie par la méthode DRASTIC de même que les indices de vulnérabilité. Les limites des différentes classes ne sont donc pas des valeurs absolues, mais relatives (Bernard, 1993). Ces limites peuvent alors varier d'une étude à une autre comme d'une région à une autre.

5.6 Conclusion

L'étude de la modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale de Rich a montrée, en régime permanent et après calage, une bonne concordance entre la piézométrie observée et la piézométrie calculée. Le résultat du calage montre une hétérogénéité importante à l'échelle de la perméabilité en concordance avec l'hétérogénéité lithologique du réservoir aquifère allant depuis les alluvions grossiers jusqu'à des dépôts fluvio-lacustres marneux ou gréseux. Les perméabilités reconstituées par le modèle montrent que les zones les plus perméables de l'aquifère (10^{-3} à 10^{-2} m/s) se situent dans la zone de Rich, ailleurs les perméabilités sont relativement faibles (jusqu'à 10^{-5} m/s).

Le bilan obtenu par le modèle montre que l'essentiel de la recharge de la nappe s'effectue par l'infiltration des eaux de crues avec un taux de 67%. La recharge par les précipitations représente seulement 33% des entrées de la nappe.

Afin d'évaluer ses caractéristiques hydrodynamiques en terme d'emmagasinement et les impacts des prélèvements et du climat sur la dynamique de l'aquifère, des simulations en régime transitoires ont été entreprises. Les résultats indiquent des coefficients d'emmagasinement très impressionnants, notamment de part et d'autre des cours d'eau traversant la nappe (plaines alluviales). Ainsi la nappe est en équilibre hydrique depuis 1980 et que la recharge directe par les cours d'eau est l'apport principal (55 – 67%). En terme de sorties, les pompages prédominent et représentent en moyenne 59%, suivis par le drainage des cours d'eau qui représente 38% ces dernières années.

Les résultats montrent que les graves sécheresses qu'a connues la zone en 1981-82 et 2000-01 n'ont pas d'effets significatifs sur les niveaux et les réserves de la nappe. La stabilité des isopièzes au cours de ces périodes de crises est le résultat conjugué des apports pérennes des sources amont captant les nappes profondes liasiques et l'absence d'un exutoire principal en aval de la nappe.

L'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines est devenue actuellement un outil efficace de gestion durable des ressources en eaux souterraines dans le monde. Dans cette étude, la méthode DRASTIC standard a été adoptée pour la nappe alluviale de Rich. Les résultats après validation par la conductivité électrique montrent que les scores élevés des paramètres DRASTIC, en particulier les scores élevés de la profondeur de l'eau, de la conductivité hydraulique et du milieu de l'aquifère sont responsables de la zone de forte vulnérabilité. Par contre les scores moyens à faibles sont le résultat

de la combinaison de la zone vadose moins poreuse, de la profondeur de l'eau et de la conductivité hydraulique.

L'intégration de cette carte de vulnérabilité dans un SIG permet de cartographier les zones à risques et d'identifier les secteurs à hiérarchiser en termes de surveillance des eaux souterraines et d'occupation du sol.

+ Zones à haut risque: Outre le degré de vulnérabilité élevé, ces zones sont caractérisées par une forte densité de la population et des activités anthropiques intensives sous forme de cultures permanentes irriguées, des carrières et des décharges publiques non contrôlées. Ces caractéristiques peuvent contribuer à la modification de la qualité des eaux souterraines. Ces zones sont principalement situées autour des zones urbaines, rurales et dans certains secteurs agricoles et couvrent 21,3% de la zone d'étude.

+ Zones à risque modéré: elles se caractérisent par un degré de vulnérabilité moyen et un développement limité des cultures permanentes et des activités anthropiques. Ces zones représentent près de 45,5% de la zone d'étude.

+ Zones à faible risque: elles sont classées par degré de vulnérabilité faible et sont essentiellement occupées par des cultures en sec, des parcours et des terrains nus qui ne couvrent que 33,2% de la zone d'étude.

Conclusion générale et perspectives

La conception et la cartographie des différentes unités hydrogéologiques au sein des trois complexes aquifères du Lias inférieur-Domérien, de l'Aalénien-Bajocien et du Bajocien-Bathonien déjà reconnus été une importante valeur ajoutée, qui a permis de vérifier plusieurs hypothèses émises au début du projet.

Cependant, un certain nombre de difficultés ont été rencontrées, liées notamment aux données souvent insuffisantes, l'absence des travaux hydrogéologiques à l'échelle régionale et la difficulté d'exploitation des travaux géologiques antérieurs, qui sont plus concernés en stratigraphie, en structurale et en paléontologie que de faciès lithologiques.

Ainsi, la plupart des coupes de sondages et forages mécaniques, établies lors de la perforation au cours des décennies de travaux, ne présentent aucune unité hydrogéologique, et sont rarement interprétées de façon précise en stratigraphie. Elles offrent de nombreux risques d'erreurs d'interprétation.

Il est clair que toutes ces incertitudes, qui ne peuvent que très rarement être levées sur la foi des seuls indices ténus résultant de la description des documents d'archives, rendent parfois extrêmement difficile dans les détails, la compréhension des structures, et tout particulièrement au centre des bassins synclinaux profonds, où les structures profondes et complexes sont situées à très grandes distances des affleurements des bordures qui pourraient en permettre la compréhension.

A cet égard, un effort a été effectué dans cette étude à travers une approche multidisciplinaire intégrant plusieurs approches et qui a servi à l'élaboration d'un schéma conceptuel des différentes unités hydrogéologiques.

En effet, la synthèse effectuée souligne la grande complexité de la zone ; l'évolution géo-structurale du Haut Atlas durant plusieurs phases, a permis le développement d'une tectonique cassante très particulière qui a donnée naissance d'une structure générale en « en blocs basculés » à la faveur des rejets des failles successives.

Sous ce schéma ce sont développés trois complexes aquifères et 15 unités hydrogéologiques :

- a) Le complexe Lias inférieur-Domérien : qui est un réservoir puissant, relativement continu et bien conservée tout le long des crêtes anticlinales ;

- b) Le complexe Aalénien-Bajocien : découpé en 6 unités structurales séparées (cuvettes synclinales), caractérisées par une succession des panneaux plus ou moins effondrés et recouvertes par les marnes et les marno-calcaires du dogger. Ils reposent sur le substratum Toarcien-Aalénien inférieurs qui constitue son radier imperméable. Généralement ces unités sont sans ou à faibles communications entre eux ;
- c) Le Bajocien-Bathonien : Très schématiquement découpé en 9 unités structurales qui correspondent chacune à des bassins hydrogéologiques plus ou moins indépendants. Le développement de la fracturation, la dominance des marnes et les importants changements de faciès limitent le développement des nappes à productivités élevées.
- d) Une nappe phréatique à surface libre contenue dans les formations Plio-Quaternaires.

L'établissement des cartes structurales (cartes du mur et du toit pour les nappes profondes et la carte du substratum imperméable pour la nappe phréatique) et la superposition de ces dernières, ont permis la détermination de l'épaisseur des aquifères profonds de l'Aalénien-Bajocien (jusqu'à 160 m), des aquifères du Bajocien-Bathonien (jusqu'à 100 m) et de la nappe alluviale de Rich (de 3 à 20m). Pour le Lias inférieur - Domérien, le calcul de l'épaisseur de l'aquifère n'a pas été possible, vu sa grande puissance et l'absence des données sur son mur.

Les écoulements au sein du Lias inférieur Domérien s'effectuent selon trois axes majeurs (N-S, NE-SO et NNO-SSE), attestant une alimentation depuis les aires d'affleurement nord. Dans les zones synclinales, la mise en charge des eaux par le Toarcien imperméable au-dessus est très fréquente.

Quant au Bajocien-Bathonien, la piézométrie montre deux axes d'écoulements majeurs (O-E et N-S) avec des gradients hydrauliques relativement faibles, ce qui atteste une faible perméabilité dans ces secteurs.

La structure de l'écoulement dans les unités du Bajocien-Bathonien est généralement hétérogène, elle apparaît être influencée par les écoulements superficiels des cours d'eau et par l'hétérogénéité du matériel aquifère (changement vertical et horizontal de faciès, failles), deux axes majeurs sont observés (NE-SO et NO-SE).

Les suivis piézométriques de ces nappes montrent une hausse dans le Lias inférieur Domérien, une stabilité dans les unités du Bajocien-Bathonien et une baisse dans les unités de l'Aalénien-Bajocien.

Il ressort de l'analyse des essais d'eau que les nappes jurassiques ne sont pas homogènes, les transmissivités obtenues sont très variables, même à l'échelle d'une seule unité hydrogéologique. Des limites étanches, sous l'action des failles ou sous des changements latéraux de faciès sont possibles ce qui atteste les hypothèses émises auparavant (structure hachée).

Les bilans des nappes identifiés montrent que les réserves les plus importantes concernent le Lias inférieur – Domérien. Le bilan de ce dernier est en équilibre (90 Mm^3 en moyenne) et constitue une ressource d'alternative en cas de manque d'eau en surface. Les flux entrants des zones nord constituent la principale source d'alimentation avec un apport de l'ordre de 50%, suivi par le drainage descendant dans certains tronçons des cours d'eau (forte perméabilité). Les infiltrations directes sur ses aires d'affleurement représentent seulement 11 % des entrées de la nappe, conformément à la réduction de ces dernières selon des crêtes anticlinales réduites et allongées. L'exutoire principal est représenté par les sources puis les flux sortants vers les zones sud.

Les bilans des autres nappes de l'Aalénio-Bajocien et du Bajocien-Bathonien sont relativement réduits.

La modélisation de la nappe alluviale de Rich en régime permanent a montré qu'elle est hétérogène conformément au matériel aquifère allant depuis les alluvions grossiers jusqu'à des dépôts fluvio-lacustres marneux ou gréseux. Les perméabilités reconstituées par le modèle montrent que les zones les plus perméables de l'aquifère (10^{-3} à 10^{-2} m/s) se situent dans la zone de Rich, ailleurs les perméabilités sont relativement faibles (jusqu'à 10^{-5} m/s).

Le bilan obtenu par le modèle en régime permanent montre que l'essentiel de la recharge de la nappe s'effectue par l'infiltration des eaux de crues avec un taux de 67%. La recharge par les précipitations représente seulement 33% des entrées de la nappe.

La modélisation en régime transitoire indique des valeurs de coefficients d'emmagasinement très impressionnantes, notamment de part et d'autre des cours d'eau traversant la nappe. Ainsi la nappe est en équilibre hydrique depuis 1980 et que la recharge directe par les cours d'eau est l'apport principal (55 – 67%). En terme de sorties, les pompes prédominent et représentent en moyenne 59%, suivies par le drainage des cours d'eau qui représente 38% ces dernières années.

Les résultats montrent que les graves sécheresses qu'a connues la zone en 1981-82 et 2000-01 n'ont pas d'effets significatifs sur les niveaux et les réserves de la nappe. La stabilité des isopièzes au cours

de ces périodes de crises est le résultat conjugué des apports pérennes des sources amont captant les nappes profondes liasiques et l'absence d'un exutoire principal en aval de la nappe.

À part quelques zones ponctuelles, la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de la nappe alluviale de Rich montre une tendance à la vulnérabilité moyenne à la pollution. D'après ce travail, l'application de la méthode DRASTIC avec la classification de (ENGEL et al., 1996) est la mieux représentative et surtout la plus sécurisante pour la nappe.

PERSPECTIVES

Cette étude a apporté une information supplémentaire importante dans la compréhension des systèmes aquifères des hauts bassins de Ziz et Rhéris, en dépit de nombreuses données manquantes ou incomplètes et le manque surtout des moyens financiers et techniques pour les campagnes d'investigation.

Afin de mieux comprendre et agrémenter les connaissances sur l'hydrogéologie de la zone, l'utilisation appropriée de données existantes et la constitution de nouvelles données, s'avèrent indispensables dans le cadre d'une gestion durable de la ressource.

Le schéma hydrogéologique conceptuel retenu des systèmes aquifères hauts atlasiques représente donc un exemple d'interprétation possible, à partir des données disponibles. Ce schéma peut être mis à jour, notamment dans les zones pauvres ou en manquantes de données.

Compte tenu des résultats obtenus dans la cartographie à la pollution des nappes les plus accessibles (Cas de la nappe de Rich), il faut protéger les zones identifiées comme étant fortement vulnérables et qui ne sont pas encore polluées. Il s'agit notamment de la localité de Rich et les deux captages ONEP d'approvisionnement en eaux potable (Figure 100) qui présentent tous l'indice de vulnérabilité le plus élevé. Dresser des périmètres de protection autour de ces captages d'AEP devient une nécessité.

Les plans d'urbanisation et d'occupation des sols au niveau de la localité de Rich doivent tenir compte des caractéristiques physiques de l'aquifère qui montrent de forts indices de vulnérabilité. L'occupation des sols doit se faire avec une urbanisation contrôlée et un assainissement adéquat pour éviter que la pollution de la nappe ne se généralise.

Bibliographie

- Abdeslam I., C. Fehdi & L. Djabri (2017). Application of drastic method for determining the vulnerability of an alluvial aquifer: Morsott-El Aouinet north east of Algeria: using arcgis environment. *Energy Procedia.*, 119, 308-317.
- ABHGZR (2010) : Etude de la monographie des ressources en eau des communes des provinces relevant de la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhéris.
- ABHGZR (2011) : Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau des bassins du Guir, Ziz, Rhéris et Maider. Rapport de la mission I.
- ABHGZR (2016).  laboration des monographies des ressources en eau des provinces et des communes relevant de la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhéris – Ville de Rich, Mission II.
- Ait Addi A (2000). Les séries du Dogger du Haut Atlas au Nord d'Errachidia : sédimentologie et lithostratigraphie d'une nouvelle formation la formation Tazigzaout," *Revue de Géologie Méditerranéenne*, Tome XXVII, 1-2, pp. 63.
- Ait Addi. A (1998). Nouvelles données sédimentologiques et géodynamiques sur les faciès de l'Aalénien-Bajocien inférieur du Haut Atlas marocain (Nord d'Errachidia). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 326(3), 193-200.
- Albinet M et J. Margat (1975). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Actes du Colloque de Moscou, Août. IAHS-AISH Publ., 103, 58-70.
- Albinet M & J. Margat (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull. BRGM*, 2 me série, 3(4), 13-22.
- Albinet M & J. Margat (1975). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Actes du Colloque de Moscou, Août. IAHS-AISH Publ., 103, 58-70.
- Aller L (1985). DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 780 p14-20.
- Aller, L., Lehr, J. H., Petty, R., & Bennett, T. (1987). DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. National Water Well Association, Worthington, Ohio, United States of America.
- Allouche N., M. Maanan., M. Gontara., N. Rollo., I. Jmal & S. Bouri (2017). A global risk approach to assessing groundwater vulnerability. *Environmental Modelling & Software*, 88, 168-182.
- Anane M., B. Abidi., F. Lachaal., A. Limam et S. Jellali (2013). GIS-based DRASTIC, pesticide DRASTIC and the susceptibility index (SI): comparative study for evaluation of pollution potential in the Nabeul-Hammamet shallow aquifer. Tunisia. *Hydrogeol J.*, 21(3): 715–731
- Anderson M. P & W. W. Woessner (1992). The role of the postaudit in model validation. *Advances in Water Resources*, 15(3), 167-173.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.
- Baali F., A. Rouabhia., N. Kherici., L. Djabri., L. Bouchaou & A. Hani (2007). Qualité des eaux souterraines et risque de pollution en milieu semi-aride. Cas de la cuvette de Ch ria (NE Algérien). *Estudios Geol gicos*, 63(2), 127-133.
- Babiker, I. S., Mohamed, M. A., Terao, H., Kato, K., & Ohta, K. (2004). Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system. *Environment International*, 29(8), 1009-1017.
- Bentekhici N., Y. Benkesmia, F., Berrichi et S. Bellal (2018).  valuation des risques de la pollution des eaux et vulnérabilité de la nappe alluviale à l'aide des données spatiales. Cas de la plaine de Sidi Bel Abb s (nord-ouest algérien). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science.*, 31(1), 43-59.
- Bernard P. (1983). Théorie et application du coefficient de Kappa. Thèse de doctorat, Univ. Laval, ISBN: 0-315-85514-2.

- Biémi J., Gwyn Q.H.J., Deslandes S., Jourda J.P., (1991). Géologie et réseaux de linéaments régionaux du bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire) : cartographie à l'aide des données Landsat TM et du champ magnétique total. Télédétection et gestion des ressources, Vol. VII, P. Gagnon (Ed.). In : 7th AQT congress, Montreal, Canada, pp. 135–145.
- Bonn, F. & Rochon, G. (1992). Précis de télédétection: principes et méthodes. Québec: Pres. Univ. Québec. AUPELF-UREF, Vol. 1.
- Bremond R et R. Vuichard (1973). Paramètres de la qualité des eaux, Ministère de la protection de la nature et de l'environnement, SPEPE, Paris, 179p.
- Castany, G. (1998). Hydrogéologie: principes et méthodes: 2e cycle. Dunod.
- Civita M. (1990) : La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Protezione e gestione delle acque sotterranee. Metodologia, Tecnologia e Obiettivi. Marno sul Panaro, 3.
- Civita, M. (1993). Ground water vulnerability maps: a review.
- Crevello, P. D. (1991). High-frequency carbonate cycles and stacking patterns: interplay of orbital forcing and subsidence on Lower Jurassic rift platforms, High Atlas, Morocco. *Sedimentary Modeling: Computer Simulations and Methods for Improved Parameter Definition: Kansas Geological Survey, Bulletin*, 233, 207-230.
- Crist, E. P., & Cicone, R. C. (1984). Comparisons of the dimensionality and features of simulated Landsat-4 MSS and TM data. *Remote Sensing of Environment*, 14(1-3), 235-246.
- DE MARSILY G. (1981) - Hydrogéologie quantitative. Masson
- Dekkaki H. C., Y. El Kayssi., M. Hilali., I. Kacimi et H. Sahbi (2016). Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution moyennant la méthode PRK: application à la nappe phréatique du Rich (Sud du Maroc)/[Vulnerability assessment of groundwater against pollution using the PRK method: application to rich groundwater (South of Morocco)]. *International Journal of Innovation and Applied Studies.*, 14(4), 917.
- DMN (Direction de la Météorologie Nationale) (2011) Les changements climatiques au Maroc: Observations et projections. DMN, Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Chargé de l'Eau et de l'Environnement, Royaume du Maroc, Casablanca.
- Donnay, J. P., & Binard, M. (1993). Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux.
- Du Dresnay, R. (1971). Extension et développement des phénomènes récifaux jurassiques dans le domaine atlasique marocain, particulièrement au Lias moyen. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(1-2), 46-56.
- Du Dresnay, R. (1979). Sédiments jurassiques du domaine des chaînes atlasiques du Maroc. In *Symposium—Sédimentation jurassique W européenell. ASF Pub Sp* (pp. 345-365).
- Du Dresnay, R. (1988). Recent data on the geology of the Middle-Atlas (Morocco). In *The Atlas System of Morocco* (pp. 293-320). Springer Berlin Heidelberg.
- Dubar, G. (1949). Carte géologique provisoire du Haut Atlas de Midelt, échelle au 1/200 000e. Notice explicative, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, 59bis.
- Duby, C., & Robin, S. (2006). Analyse en composantes principales. Institut National Agronomique, Paris-Grignon, 80.
- Duffaud, F. (1960). Contribution à l'étude stratigraphique du bassin secondaire du Haut-Atlas occidental (Sud-Ouest marocain). *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(6), 728-734.
- Dupuit J. (1863) Etudes Théoriques et Pratiques sur le Mouvement des Eaux dans les Canaux Découverts et à Travers les Terrains Perméables. 2nde édition, Dunod, Paris.
- Eau du Maroc (2017). Tranches de facturation et tarifs d'eau potable à Casablanca. <http://www.eaudumaroc.com/2017/05/la-conductivite.htm> (Consulté le 18 septembre 2018).
- El Guerouani, A. (2005). Modélisation mathématique en hydrogéologie, support du cours, Maitrise Ès sciences et techniques 2 : spécialité Hydrogéologie, Département des sciences de la terre, FST Fès-Saïss.
- El Harfi, A., Guiraud, M., & Lang, J. (2006). Deep-rooted “thick skinned” model for the High Atlas Mountains (Morocco). Implications for the structural inheritance of the southern Tethys passive margin. *Journal of Structural Geology*, 28(11), 1958-1976.

- El Idrysy, H & De Smedt, F. (2006). Modeling groundwater flow of the Trifa aquifer, Morocco," *Hydrogeology journal*, vol. 14, pp. 1265-1276.
- El Kayssi, Y., Hilali, M., & Kacimi, I. (2016). Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale de Rich (Haut Atlas central, Maroc)[Hydrodynamic modeling of the Rich alluvial aquifer (Central high atlas, Morocco)]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 14(3), 758.
- El Kayssi Y., M. Hilali & I. Kacimi (2016). Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale de Rich (Haut Atlas central, Maroc)[Hydrodynamic modeling of the Rich alluvial aquifer (Central high atlas, Morocco)]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 14(3), 758.
- El Kochri A et Chorowicz J (1988). Tectonique synsedimentaire et style ejectif dans la couverture mesozoïque du Haut Atlas oriental (Maroc); exemple de la boutonniere de Mougueur. *Bulletin de la Société géologique de France*, vol. 4, no 4, p. 541-550.
- El Kochri, A., & Chorowicz, J. (1996). Oblique extension in the Jurassic trough of the central and eastern High Atlas (Morocco). *Canadian Journal of Earth Sciences*, 33(1), 84-92.
- EL Kochri A. (1996). Géométrie et mécanismes de la déformation du Haut Atlas Centro-oriental (Maroc). Thèse Doctorat d'Etat, Univ. Med. V, Rabat.
- El Kochri, A. (1981). Etude géologique de la boutonnière de Mougueur-El Bour (Haut Atlas oriental, Maroc).
- Emrl. (1999). Groundwater Modeling System. Environmental Modeling Research Laboratory, Brigham Young University, Utah
- Engel B.A., K.C.S. Navulur., B.S.Cooper & L. Hahn (1996). Estimating groundwater vulnerability to non-point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale, *Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ.* 235, 521–526.
- European Community (1993). Corine land cover-Guide technique. Office des Publications Officielles des Communautés Européennes, Série environnement, sécurité nucléaire et protection civile, 144 p.
- Foster et al. (1988). Groundwater pollution. Risque assessment. A methodology using available data WHO-PAHO-CEPIS Lima, Pérou, pp1-87.
- Foster S. S. D. (1987). Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy: International Conference, 1987, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants The Hague, Netherlands Organization for Applied Scientific Research. Netherlands Organization for Applied Scientific Research.
- Ghazavi R & Z. Ebrahimi (2015). Assessing groundwater vulnerability to contamination in an arid environment using DRASTIC and GOD models. *Int J Environ Sci Technol.*, 12(9):2909–2918
- Gringarten, A. C., & FLOPETROL, B. (1982). Flow-Test Evaluation of Fractured Reservoirs. *Recent trends in hydrogeology*, 189, 237.
- Grandjaquot M.P. (1999) : Outils statistiques. Éditions ESKA.
- Hadri, M. (1993). Un modèle de plate-forme carbonatée au Lias-Dogger dans le Haut-Atlas Central au nord-ouest de Goulmina, Maroc (Doctoral dissertation, Paris 11).
- Hamza M., A. Added., A. Francès., R. Rodriguez., M. Ajmi et S. Abdeljaoued (2008). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltine-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est tunisien) selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science.*, 21(1), 75-86.
- Hamzam H., A. Added., A. Frances et R. Rodriguez (2007). Validity of the vulnerability methods DRASTIC, SINTACS and SI applied to the study of nitrate pollution in the phreatic aquifer of Metline-Ras Jebel-Raf Raf. *Comptes Rendus Geoscience.*, 339(7), 493-505.
- Hamza M. H., A. Added., A. Frances & R. Rodriguez (2007). Validity of the vulnerability methods DRASTIC, SINTACS and SI applied to the study of nitrate pollution in the phreatic aquifer of Metline-Ras Jebel-Raf Raf. *Comptes Rendus Geoscience*, 339(7), 493-505.
- Hentati I. (2004). Etude et Cartographie de la Vulnérabilité Environnementale de la Nappe Phréatique de Sfax–Agareb. Mémoire de MASTERE, Fac. Sc. Sfax. 102p.

- Hilali M., Boualoul M., et Sahbi H. (2011) : Etat des connaissances hydrogéologiques sur les aquifères du Haut Atlas Central : Cas de l'aquifère quaternaire de la vallée du Rich (Nord d'Errachidia). 6èmes journées internationales des géosciences de l'environnement, Oujda, 21, 22 et 23 Juin 2011.
- Hilali M., Boualoul M., Sahbi H., et Benamara A., (2012) : Haut Atlas de Rich (Maroc) : Impact des changements climatiques et des unités structurales sur la quantification des ressources en eau. 2ème Colloque International sur la Gestion et la Préservation des Ressources en Eau (CIGPRE 2). Meknès, les 10 – 11 et 12 mai 2012.
- Hilali M., (2015) : Hydrogéologie et ressources en eau du Tafilalet et ses régions limitrophes (Sud-Est du Maroc) : Connaissance, prospection, caractérisation, exploitation et gestion des ressources en eau. Rapport de l'habilitation universitaire, Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V.
- Hirata, R. C. A., Bastos, C. R. A., Rocha, G. A., Gomes, D. C., & Iritani, M. A. (1991). Groundwater pollution risk and vulnerability map of the State of São Paulo, Brazil. *Water Science and Technology*, 24(11), 159-169.
- In "AVI" (1992): A Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada. Prairie Province Water Board, Regina, Saskatchewan". Par Van Stempvoort, D., Ewert, L., and Wassenaar (1992).
- Khosravi K., M. Sartaj., F. T. C. Tsai., V. P. Singh., N. Kazakis., A. M. Melesse., ... & B. T. Pham (2018). A comparison study of DRASTIC methods with various objective methods for groundwater vulnerability assessment. *Science of The Total Environment*, 642, 1032-1049.
- Kouamé F. (1999) : Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitaires: exemple de la région semimontaine à l'ouest de la Côte d'Ivoire. *Télédétection* 1, 139–156.
- La Cicatrice, D. Z. (2012). Analyse linéaire des images landsat-tm et spot de l'atlas centro-septentrional: cartographie du prolongement sw de. *Revue télédétection*, 10(4).
- Laghouag M.Y. (2011) : Apport de la télédétection (images Landsat 7 ETM+) pour la cartographie géologique de la région d'Aflou (Atlas saharien). Mémoire de fin d'études. Alger. 101p
- Lallemant-Barres A. (1994). Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Etude documentaire préliminaire. Rapport BRGM R, 37928.
- Landis J. R et G. G. Koch (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics.*, 159-174.
- Laville, E. (1985). Evolution sédimentaire, tectonique et magmatique du bassin jurassique du Haut Atlas (Maroc): modèle en relais multiples de décrochements (Doctoral dissertation).
- Ledoux, E. (1986). Modèles mathématiques en hydrogéologie, Centre d'information géologique, Ecole Nationale Supérieure des mines de Paris.
- Lu G. Y et D. W. Wong (2008). An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & geosciences.*, 34(9), 1044-1055.
- Marcolongo, B., & Pretto, L. (1987). Aquifer vulnerability of the plain northwards of Vicenza.
- Margat J (1952). Le Haut Atlas calcaire (Hydrogéologie du Maroc-Chap. VI-2). Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc n° 97.
- Margat, J. (1991). La vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions.
- Marsily, G. D. (1981). Hydrogéologie quantitative. Masson.
- Matheron G. (1965). Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature. Masson et CIE.
- Matheron G. F. (1971). The theory of regionalized variables and its applications, volume 5 of Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Mattauer, M., Tapponnier, P., & Proust, F. (1977). Sur les mécanismes de formation des chaînes intracontinentales; l'exemple des chaînes atlasiques du Maroc. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(3), 521-526.
- McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1988). MODFLOW, A Modular Three-Dimensional Finite Difference Flow Model.
- Mehdi, M., Neuweiler, F., & Wilmsen, M. (2003). Les formations du Lias inférieur du Haut Atlas central de Rich (Maroc): précisions lithostratigraphiques et étapes de l'évolution du bassin.
- Michard, A. (1976): *Éléments de géologie marocaine*. - Notes Mém. Serv. géol. Maroc, 252, 408 pp., Rabat.

- Michard, A., Ouanaïmi, H., Hoepffner, C., Soulaïmani, A., & Baidder, L. (2010). Comment on Tectonic relationships of Southwest Iberia with the allochthons of Northwest Iberia and the Moroccan Variscides by JF Simancas et al.[CR Geoscience 341 (2009) 103-113].
- Mohammad A. H. (2017). Assessing the groundwater vulnerability in the upper aquifers of Zarqa River Basin, Jordan using DRASTIC, SINTACS and GOD methods. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 9(2), 44-53.
- Mohammadi K., R. Niknam & V. J. Majd (2009). Aquifer vulnerability assessment using GIS and fuzzy system: a case study in Tehran–Karaj aquifer, Iran. *Environmental geology*, 58(2), 437-446.
- Mouaddine L. (1997) : Utilisation des cartes de vulnérabilité pour la délimitation des zones de protection des captages d'eau potable. Cas du champ captant de Fouarat. Thèse de troisième cycle. Université Cadi Ayad. 193 p.
- Murat V., D. Paradis., M. M. Savard., M. Nastev., E. Bourque., A. Hamel., ... & R. Martel (2003). Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec: évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. *Commission géologique du Canada, Recherches en cours*, 14 p.
- Murat, V. (2000). Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution: application aux aquifères granulaires du piémont laurentien (Doctoral dissertation, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- Murat, V., Martel, R., Savard, M., Nastev, M., Paradis, D., Michaud, Y., ... & Therrien, R. (2003). Comparing various vulnerability evaluation methods in two Canadian hydrogeological settings. In *Proceedings of the International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk* (pp. 60-70).
- Murat V., D. Paradis., M. M. Savard., M. Nastev., E. Bourque., A. Hamel., ... & R. Martel (2003). Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec: évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. *Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada*.
- N.M (2002). Norme Marocaine de qualité des eaux. Arrêté conjoint du Ministre de l'équipement et du Ministre chargé de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'habitat et de l'environnement n° 1275-01 du 10 chaabane 1423 (17 -10-2002) définissant la grille de qualité des eaux de surface. *Bull. Off.*, n°5062. du 30 ramadan 1423(5-12-2002).
- Nouayti N., D. Khattach & M. Hilali (2015). Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc)[Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco)]. *Journal of Materials and Environmental Science*, 6, 1068-1081.
- ORMVAT (2015). Monographie des CMV de la zone d'action de l'ORMVA du Tafilalet.
- Pacheco F. A. L., L. M. G. R. Pires., R. M. B. Santos & L. S. Fernandes (2015). Factor weighting in DRASTIC modeling. *Science of the Total Environment*, 505, 474-486.
- Pardé M. (1933) : Fleuves et Rivières, Sème édition, Librairie Armand Colin, 241 p., Paris.
- Piqué, A., & Laville, E. (1996). The central Atlantic rifting: Reactivation of Palaeozoic structures?. *Journal of Geodynamics*, 21(3), 235-255.
- Ribeiro L. (2000). Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação. Nota interna, (não publicada), ERSHA-CVRM.
- Robins N., B. Adams., S. Foster., & P. Palmer (1994). Groundwater vulnerability mapping: the british perspective. *Hydrogéologie (Orléans)*, (3), 35-42.
- Roche, M. (1963). *Hydrologie de surface* (No. 551.49 R6).
- Rodier J., C. Bazin., J.P. Broutin., P. Chambon, H. Champsaur et L. Rodi (1996). *L'analyse de l'eau*. 8e édition. Dunod, Paris, France, 152 p.
- Roy B et D. Bouyssou (1993). *Aide multicritère à la décision: méthodes et cas*. Paris: Economica, 695 p.
- RUSSO, Ph. (1927) : Les chaînes de l'Atlas. Essai d'une vue d'ensemble sur la structure des chaînes marocaines - *Rev. géogr. Maroc*, 6, 73–82.
- Saloua Mnissar Himyari a*, Christian Hoepffner a , Mohammed Benzakour b et Driss EL Hadani b. (2002) : Étude structurale du Haut Atlas Oriental (Maroc) à l'aide de l'analyse linéamentaire des images HRV (XS) de SPOT. *Télédétection*, vol. 2, n° 4, p. 243-253.

- Saouini H. E., M. Amharref & A. S. Bernoussi (2014). Vulnérabilité à La Pollution des Eaux Souterraines: Statique ou Dynamique? Application à la Nappe de R'Mel (Maroc)/[Vulnerability of the Groundwater Pollution: Static or Dynamic? Application of R'Mel's Aquifer (Morocco)]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 6(4), 929.
- Sarih, Soumia, Quiquerez, Amélie, GARCIA, Jean-Pierre, et al. (2007) : Sédimentologie et quantification de la subsidence des séries liasiques dans le Haut Atlas Central marocain (coupe de Fom Zabel, région de Rich). *Africa Geoscience Review*, vol. 14, no 2, p. 181-193.
- Savané, I. (1995). Application de la télédétection à la recherche des eaux souterraines en milieu de socle cristallin: cas d'Odienné, Côte d'Ivoire. AUPELF-UREF, Télédétection et Ressource en eau, Ve journée scientifique de Tunis, 111–120. Québec: Presse de l'Université de Québec.
- Secrétariat d'état charge de l'eau et de l'environnement - ABHGZR (2011). Actualisation du plan directeur d'aménagement intégré des Ressources en eau des bassins de Guir – Ghri – ziz et maider - Phase 1 : Provinces Errachidia, Ouarzazate, Zagora et Figuig - Mission 1 : Evaluation des ressources en eau.
- Sinan M & M. Razack (2009). An extension to the DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquifer of Marrakech (Morocco). *Environmental Geology*, 57(2), 349-363.
- Souhel, A. (1996). Le Mésozoïque dans Haut Atlas de Beni-Mellal (Maroc). Stratigraphie, sédimentologie et évolution géodynamique. *Strata. Série 2, Mémoires*, (27).
- Stigter T. Y., L. Ribeiro & A. C. Dill (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal*, 14(1-2), 79-99.
- Stigter T. Y (2005). Integrated analysis of hydrogeochemistry and assessment of groundwater contamination induced by agricultural practices. Universidade Técnica de Lisboa.
- Strahler, A. N. (1964). Part II. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York, 4-39.
- Studer, M., & Du Dresnay, R. (1980). Deformations synsedimentaires en compression pendant le Lias supérieur et le Dogger, au Tizi n'Irhil (Haut Atlas central de Midelt, Maroc). *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(3), 391-397.
- Teixell, A., Arboleya, M. L., Julivert, M., & Charroud, M. (2003). Tectonic shortening and topography in the central High Atlas (Morocco). *Tectonics*, 22(5).
- Uhan J., G. Vižintin & J. Pezdič (2011). Groundwater nitrate vulnerability assessment in alluvial aquifer using process-based models and weights-of-evidence method: Lower Savinja Valley case study (Slovenia). *Environmental earth sciences*, 64(1), 97-105.
- USGS Office of Groundwater, 2015. [Online] Available: <http://water.usgs.gov/ogw/modflow/MODFLOW.html> (July 06, 2015).
- Van Stempvoort, D., Ewert, L., & Wassenaar, L. (1992). AVI: A method for groundwater protection mapping in the Prairie provinces of Canada. *Prairie Provinces Water Board*.
- Vrba J & A. Zoporozec (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability, IAH International Contribution for Hydrogeology. Heise, Hannover, 131.
- Wang M & P. J. Howarth (1994). Multi-source spatial data integration: problems and some solutions. *Canadian journal of remote sensing*, 20(4), 360-367.
- Warne, J. E. (1988). Jurassic carbonate facies of the central and eastern High Atlas rift, Morocco. In *The Atlas System of Morocco* (pp. 169-199). Springer Berlin Heidelberg.
- Xiaobin, Z. (2003). Groundwater modeling system (GMS) software. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 5, 53-55.
- Yésou, H., Pion, J. C., Besnus, Y., & Saint-Jean, R. (1990). Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu tropical. Exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala (Togo). IIIèmes Journées Scientifiques du Réseau Télédétection UREF, Toulouse, 143-164.
- Yesou, H., Poin, J. C., Besnus, Y. & Saint Jean, R. (1993). Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu.

ANNEXES

Annexe 1. Débits annuels observés des stations hydrologiques des hauts bassins de Ziz et Rhéris (m³/s)

<i>Année</i>	<i>Ait Bouijjane</i>	<i>Barrage HA</i>	<i>Foum Tillicht</i>	<i>Foum Zaabel</i>	<i>M'zizel</i>	<i>Tadighoust</i>
1960-1961						
1961-1962						0.343
1962-1963						1.967
1963-1964						0.084
1964-1965						1.404
1965-1966						11.289
1966-1967						0.882
1967-1968						2.239
1968-1969						0.935
1969-1970						0.335
1970-1971				2.38		0.198
1971-1972				5.9		0.375
1972-1973				5.5		1.103
1973-1974				2.27		0.258
1974-1975				5.56		0.632
1975-1976	0.38		4.55	7.24		0.402
1976-1977	0.45		2.8	4.32		0.51
1977-1978	0.63		1.33	1.52		0.174
1978-1979	0.44		1.47	2.61		0.147
1979-1980	1.61		2.08	5.52		1.56
1980-1981	0.76		0.76	0.87		0.37
1981-1982	0.37		0.88	1.1		0.208
1982-1983	0.45		0.99	0.71		0.057
1983-1984	0.23		0.47	0.98		0.028
1984-1985	0.56		0.84	0.55		0.087
1985-1986	0.3		2.54	1.1	1.59	1.231
1986-1987	0.34		1.37	1.32	2.99	0.991
1987-1988	0.34		2.2	6.46	1.19	0.628
1988-1989	1.43		5.18	10.46	2.96	1.856
1989-1990	2.19		2.86	16.34	0.96	5.78
1990-1991	1.2		3.48	7	0.63	2.59
1991-1992	0.82		1.76	2.42	0.18	0.507
1992-1993	0.49	1.395	1.06	0.93	0.1	0.208
1993-1994	1.27	0.077	0.59	7.34	5.18	3.311
1994-1995	1.41	1.219	1.14	4.71	2.03	1.481
1995-1996	0.9	2.234	3.21	10.17	3.94	2.721
1996-1997	0.79	3.764	2.02	7.77	1.21	0.489
1997-1998	1.22	2.381	5.47	1.67	0.9	
1998-1999	0.7	0.792	0.68	0.84	0.38	
1999-2000	1.79	1.007	1.09	4.76	1.69	0.615
2000-2001	1.46	0.002	0.58	0.98	0.57	0.42
2001-2002	0.56	0	3.78	5.86	1.19	1.608
2002-2003	0.48	1.394	0.77	0.82	0.71	0.305
2003-2004	0.44	0.788	2.75	5.35	1.08	1.214
2004-2005	3.08	1.344	0.6	0.99	1.01	0.039
2005-2006	0.3	0.675	1.13	3.74	1.41	0.634
2006-2007	2.27	3.785	4.49	9.33	3.6	2.142
2007-2008	0.75	1.166	1.63	4.26	1.35	
Moyenne	0.92	1.38	2.02	4.25	1.60	1.24
Min	0.23	0	0.47	0.55	0.1	0.028
Max	3.08	3.76	5.47	16.34	5.18	11.29

Annexe 2. Les superficies des PMH des sous-bassins du Haut Ziz

Sous bassin versant	Secteur	Commune	Seguia	Superficie irriguée (ha)	Source d'eau d'irrigation		
					Pérenne (au fil de l'eau)	souterraine	Autre
ZIZ-SBV1	FOUM ZAABEL - PONT AIT OUTHMANE	El Kheng	Achbarou	21.784	Ziz	x	x
			Ait Atman	19.301	Ziz	x	x
			Ait Youssef	16.525	Ziz	x	x
			Ifri	43.33	Ziz	x	x
			Tabourzimt	5	Ziz	x	x
			Tijante	0.505	Ziz	x	x
	PONT AIT OTHMANE - BGE H. ADDAKHIL	Daou Ighram	7.641	Ziz	x	x	
		Lajdid	12.02	Ziz	x	x	
		Lajdid Tahtania	15.305	Ziz	x	x	
ZIZ-SBV3	AIT AATOU - HAMAT MOULAY ALI CHRIF	Gars Tiaalalin	Asfalat	148.62	Ziz	x	x
			Assamer	111.9	Ziz	x	x
			Tozzelte	51.82	Ziz	x	x
	AIT KHOJMANE - KARRANDOU	Gars Tiaalalin	Boydighan	46.185	Ziz, S. Hamza	x	x
			Chrif	112.12	Ziz	x	x
			Tagzirt	15.43	Ziz	x	x
			Tahizount	45.45	Ziz	x	x
		Sidi Ayad	Boydighan	0.08	Ziz	x	x
	AMOUGUER - TAMAGOURT	Amouguer	Mtazougart	0.306	Ziz	x	x
			Takhatarte	1.05	Ziz	x	x
		M'Zizel	Takhatarte	58.3802	Ziz	x	x
			Tissikalte	39.2422	Ziz	x	x
	KARRANDOU-HAMAT MOULAY ALI CHERIF	Gars Tiaalalin	Albouchamia	36.52	Ziz	x	x
			Amaalak	32.37	Ziz	x	x
			Armal	25.34	Ziz	x	x
			Karrandou	95.87	Ziz	x	x
			Lkbira	55.11	Ziz	x	x
			Tamssasst	25.434	Ziz	x	x
	OUALLAL	M'Zizel	Amalou	67.576	Ziz	x	x
			Assamar	58.7986	Ziz	x	x
			Targa N'oudrar	11.64	Ziz	x	x
			Targua N'ouamas	20.255	Ziz	x	x
			Targua N'ouassif	22.94	Ziz	x	x
	OUALLAL - CONFLUENCE RICH	M'Zizel	Anarouz	39.3925	Ziz	x	x
			Imjrar	0.825	Ziz	x	x
			Tamajjalt	46.9632	Ziz	x	x

Sous bassin versant	Secteur	Commune	Seguia	Superficie irriguée (ha)	Source d'eau d'irrigation		
					Pérenne (au fil de l'eau)	souterraine	Autre
ZIZ-SBV4			Taroua M'kour	26.2125	Ziz	x	x
			Zibane	52.5375	Ziz	x	x
		Rich	Tahinouste	13.356	Ziz	x	x
		Sidi Ayad	Boukhoulouf	49.4759	Ziz	x	x
			Ighejd	175.393	Ziz	x	x
			Tadraklout	66.18	Ziz	x	x
			Zibane	0.05	Ziz	x	x
	PONT RICH - AIT KHOJMANE	Gars Tiaalalin	Aada	12.8488	Ziz	x	x
			Bouangarf	10.9814	Chaabat Boungarf	x	x
			Garcia	248.099	Ziz	x	x
		Municipalite Rich	Garcia	0.1728	Ziz	x	x
	TAMAGOURT - OUALLAL	M'Zizel	Amalou	69.0065	Ziz	x	x
			Assamer	149.3145	Ziz	x	x
			Fouzoud	10	Ziz	x	x
			M'Zizel	30.4745	Ziz	x	x
			Tamazdart	71.358	Ziz	x	x
	TILLICHT RICH	Gars Tiaalalin	Tillicht Charkia	0.034	Ziz, Sidi Ayad	x	x
		Municipalite Rich	Asaka	29.5241	Sidi Ayad	x	x
		Sidi Ayad	Asaka	73.2246	Sidi Ayad	x	x
			Sidi Ayad	84.924	Sidi Ayad	x	x
			Tamazight	34.3155	Sidi Ayad	x	x
			Tamdafit	2.652	Sidi Ayad	x	x
			Tillicht Charkia	27.306	Ziz, Sidi Ayad	x	x
	AND TASOUFANT	Zaouiat Sidi Hamza	Amalou	0.42	Sidi Hamza	x	x
			Amalou Nait Mouaali	0.189	Tamja	x	x
			Amalouyen	1.12	Tamja	x	x
			Amazder	16.59	Tamja	x	x
			Assamer	3.535	Tamja	x	x
			Boghalim	1.945	Tamja	x	x
			Boutourirt	1.225	Sidi Hamza	x	x
			Ikhh Nighir	7.231	Tamja	x	x
			Imi Ntbniht	0.28	Sidi Hamza	x	x
			Imi Zergane	0.977	Sidi Hamza	x	x
			Mimalal	2.819	Sidi Hamza	x	x
			Moulay Ben Atmane	0.476	Tamja	x	x
			Talat Nabde Louahed	16.205	Tamja	x	x
			Tamja	1.766	Tamja	x	x

Sous bassin versant	Secteur	Commune	Seguia	Superficie irriguée (ha)	Source d'eau d'irrigation		
					Pérenne (au fil de l'eau)	souterraine	Autre
ENZALA			Targha N'oumalou	2.149	Sidi Hamza	x	x
			Targha N'oussamer	1.204	Sidi Hamza	x	x
			Tine Oumerghad	0.336	Sidi Hamza	x	x
			Tizi N'kolal	10.521	Tamja	x	x
			Aabari	5.495	Aabari	x	x
	ENZALA	Enzala	Ait Chabri	0	Aabari	x	x
			Ait Kharou	105.41	Tairart	x	x
			Ait Khouya Ali	2.625	Tairart	x	x
			Ait L'aabasse	53.86	Enzala	x	x
			Ait Wajaud	106.88	Tairart	x	x
			Amalou	14.19	Enzala	x	x
			Assamer	10.13	Aabari, ENZALA	x	x
			Assanf	8.015	Enzala	x	x
			Boudaadaa	38	Boudaadaa	x	x
			Boufolousse	14	Souf Gmar	x	x
			Bouissarouane	10.575	Enzala	x	x
			El Moten	0.2	Ait Aadi	x	x
			Elmoten 1	0.25	Ait Aadi	x	x
			Ibahbahne	4.974	Aabari	x	x
			Ihandar	0.24	Aabari	x	x
			Imizdaggh	51.805	Aabari	x	x
			Isghi	11.5	Isghi	x	x
			Nomazigh	1.1	Enzala	x	x
			Soufgmar	31.25	Souf Gmar	x	x
			Tadawte Tabirchant	0.78	Aabari	x	x
			Taghzout	6.265	Enzala	x	x
			Takat	55.5	Enzala	x	x
			Talmoute El Ghach	0	Aabari	x	x
		Sidi Ayad	Amouguer	8.18	Souf Gmar	x	x
			Assamer	68.465	Aabari, ENZALA	x	x
			Oujarbouaa	32	Enzala	x	x
			Outaza	6.8	Enzala	x	x
			Tabouaajajt	50.065	Enzala	x	x
			Tabouaatmante	6	Enzala	x	x
			Tafilalit	62.9	Enzala	x	x
			Tahmidante	1.5	Enzala	x	x
			Talaatmanite	137.43	Enzala	x	x

Sous bassin versant	Secteur	Commune	Seguia	Superficie irriguée (ha)	Source d'eau d'irrigation		
					Pérenne (au fil de l'eau)	souterraine	Autre
ZIZ-SBV5			Talyasset	90.75	Enzala	x	x
			Tifikra	103.21	Madourt	x	x
			Tiza	7.87	Souf Gmar	x	x
	OUED SIDI HAMZA : TILLICHT-TASOUFANT	Sidi Ayad	AIT Bouchboud	43.362	Sidi Hamza	x	x
			AIT Ouaalou	44.7152	Sidi Hamza	x	x
			Boutlghamt	0.973	Sidi Hamza	x	x
			Imider	18.683	Sidi Hamza	x	x
			Iouraghen	20.6	Sidi Hamza	x	x
			Tabassidite	7.868	Sidi Hamza	x	x
			Tabouhlifte	1.785	Sidi Hamza	x	x
			Takbilt	6.265	Sidi Hamza	x	x
			Talghoult	45.992	Sidi Hamza	x	x
			Taroua N'faska	21.294	Sidi Hamza	x	x
			Tassoufante	3.164	Sidi Hamza	x	x
	ZAOUIAT SIDI HAMZA	Zaouiat Sidi Hamza	Abdelmoumen	16.7231	Sidi Hamza	x	x
			Agmadine	8.512	Sidi Hamza	x	x
			Agmadine Tazroufte	4.613	Sidi Hamza	x	x
			Aguerd Ntargua	0.1645	Source	x	x
			Ait Aada	10.197	Anghrif	x	x
			Ait Aissa	0.42	Source	x	x
			Ait Baba Said	0.756	Source	x	x
			Ait Ouagmar	3.766	Sidi Hamza	x	x
			Ait Taka	7.34	Anghrif	x	x
			Ajmou	9.408	Sidi Hamza	x	x
			Almou Bassou	0.224	Aka Almou Bassou	x	x
			Almoznain	11.592	Sidi Hamza	x	x
			Bouygnoun	3.956	Sidi Hamza	x	x
			Drag	0.378	Aka Mchaib	x	x
			Ighzdiss	0.1575	Source	x	x
			Iguer Ntmizar	0.686	Source	x	x
			Ikhef Ntourirt	0.8295	Aka Nghrif	x	x
			Issiridn	4.021	Aka Issiridn	x	x
			Labdiaa	1.757	Anghrif	x	x
			Mchaib	4.27	Aka Mchaib	x	x
			Taghroute Nait Touali	0.448	Aka Nghrif	x	x
			Takhatarte	33.622	Sidi Hamza	x	x
			Talat Ntarja	3.514	Aka Nghrif	x	x
			Targa N'jmaat	1.309	Source	x	x

Sous bassin versant	Secteur	Commune	Seguia	Superficie irriguée (ha)	Source d'eau d'irrigation		
					Pérenne (au fil de l'eau)	souterraine	Autre
			Tassarourte	0.084	Aka Tassarourte	x	x
			Tissart	6.37	Sidi Hamza	x	x
			Touchanine	3.5	Sidi Hamza	x	x
ZIZ-SBV6	AIT YAAKOUB	Amouguer	Aghanbou	2.52	Assif N'oumalou	x	x
			Amalou	3.605	Assif N'oumalou	x	x
	AMOUGUER - TAMAGOURT	Amouguer	Aatouch	3.5792	Ziz	x	x
			Afadghis Nissohide	1.08	Ziz	x	x
			Agoulmam	1.872	Ziz	x	x
			Agouni	1.9737	Ziz	x	x
			Ait Aarchi	1.08	Ziz	x	x
			Ait Baassou	0.234	Ziz	x	x
			Almou Ntoughach	2.2815	Ziz	x	x
			Amalou	12.8138	Ziz	x	x
			Amalou Nouaissa	2.798	Ziz	x	x
			Amalou Ntagandouzte	18.3671	Ziz	x	x
			Amalou Ntigadrin	3.3259	Ziz	x	x
			Amalou Ntoughache	2.6875	Ziz	x	x
			Assamr	8.564	Ziz	x	x
			Assamr Nouaissa	4.287	Ziz	x	x
			Assamr Ntigadrin	5.1911	Ziz	x	x
			Assamr Ntoughach	3.414	Ziz	x	x
			Assamr Tagandouzt	24.6156	Ziz	x	x
			Assfalou	0.567	Ziz	x	x
			Bassou Ouali	0.576	Ziz	x	x
			Bouabghour	3	Ziz	x	x
			Bouaghioul	1.9737	Ziz	x	x
			Bouaghrour	0.36	Ziz	x	x
			Boutbouda	3.285	Ziz	x	x
			Khaboute	0.64	Ziz	x	x
			Lbarj Nhsman	0.45	Ziz	x	x
			Lghabat	1.674	Ziz	x	x
			Lghabt Timagialin	2.1078	Ziz	x	x
			Lkhous Nijiri	0.36	Ziz	x	x
			Maachra	1.224	Ziz	x	x

Sous bassin versant	Secteur	Commune	Seguia	Superficie irriguée (ha)	Source d'eau d'irrigation		
					<i>Pérenne (au fil de l'eau)</i>	<i>souterraine</i>	<i>Autre</i>
			Mifrouan	4	Ziz	x	x
			Mismlal	2.16	Ziz	x	x
			Moughbalou	0.477	Ziz	x	x
			Moumrabt	10.2618	Ziz	x	x
			Mtaoualt	0.324	Ziz	x	x
			Mtazougart	0.72	Ziz	x	x
			Ou Faska	1.866	Ziz	x	x
			Outaali	1.026	Ziz	x	x
			Outalamine	0.36	Ziz	x	x
			Outhami	1.206	Ziz	x	x
			Taboughzoult	0.51	Ziz	x	x
			Tachmirt	3.555	Ziz	x	x
			Taghrout	1.08	Ziz	x	x
			Tagoutlamt	4.4743	Ziz	x	x
			Tahout	18.1601	Ziz	x	x
			Tamaaourt	1.575	Ziz	x	x
			Tamarsalast	1.44	Ziz	x	x
			Tamazouzt	7.389	Ziz	x	x
			Tamdaht	8.4636	Ziz	x	x
			Tigra	0.162	Ziz	x	x
			Tikhibout	0.2	Ziz	x	x
			Tinifri	0.252	Ziz	x	x
			Toughach Charkia	7.107	Ziz	x	x

Annexe 3. Les superficies des PMH des sous bassins du Haut Rhéris

Sous bassin versant	Station hydrologique	Secteur	Commune	Seguia	Superficie irriguée (ha)	Source d'eau d'irrigation		
						Pérenne (au fil de l'eau)	souterraine	Autre
RH-SBV1	Tadighoust	-	CR Amellagou	-	450	Rhéris	x	x
RH-SBV2	-	-	CR Tadighoust	-	0	-	x	x
RH-SBV3	Amouguer Taghia	-	CR Assoul	-	212	Rhéris	x	x
RH-SBV4	-	-	CR Aghbalou N Kerdous	-	246	Ifer	x	x
RH-SBV5	Ait Bouijane	-	CR Ait Hani CR Toudgha El Oulia CR Ouaklim	-	0	-	x	x
RH-SBV6	-	-	CR Outerbat CR Amouguer CR Ait Yahya	-	0	-	x	x
RH-SBV7	-	-	CR Ouaklim CR Imider CR Ait Sedrate Jbel El	-	0	-	x	x
RH-SBV8	Tamtetoucht	-	CR Ait Hani	-	0	-	x	x

Annexe 4. Calcul des prélèvements nets en amont des sous bassins des hauts Ziz et Rhéris

Sous bassin versant	Station hydrologique	Superficie station (km ²)	Débit station (m ³ /s)	Apport station influencé (Mm ³)	Superficie irriguée amont (ha)	Prélèvements moyen (m ³ /ha)	Prélèvement total (Mm ³)	Retour d'irrigation (Mm ³)	Prélèvement Net (Mm ³)
ZIZ-SBV1	B.H. Addakhil	473	1.38	43.52	141.41	7731	1.09	0.25	0.84
ZIZ-SBV2	-	212	-	-	0	0	0	0	0
ZIZ-SBV3	Foum Zaabel	1528	4.18	131.82	2407.06	6341	15.26	4.21	11.05
ZIZ-SBV4	Foum Tillilcht	1190	2.02	63.7	1391.9	6923	9.64	2.44	7.2
ZIZ-SBV5	Zaouiat Sidi Hamza	113	-	-	138.62	6126	0.85	0.24	0.61
ZIZ-SBV6	Amouguer M'Zizel	1208	1.59	50.14	197.28	6551	1.29	0.35	0.94
RH-SBV1	Tadighoust	909	1.24	39.1	450	6700	3.02	0.75	2.26
RH-SBV2	-	130	-	-	0	6700	0	0	0
RH-SBV3	Amouguer Taghia	1158	-	-	212	6700	1.42	0.36	1.07
RH-SBV4	-	488	-	-	246	6700	1.65	0.41	1.24
RH-SBV5	Ait Bouijane	340	0.92	29.01	0	6700	0	0	0
RH-SBV6	-	102	-	-	0	6700	0	0	0
RH-SBV7	-	112	-	-	0	6700	0	0	0
RH-SBV8	Tamtetoucht	253	-	-	0	6700	0	0	0

Annexe 5. Côtes et profondeurs du toit du Lias inf-Domérien – Traitement des SE

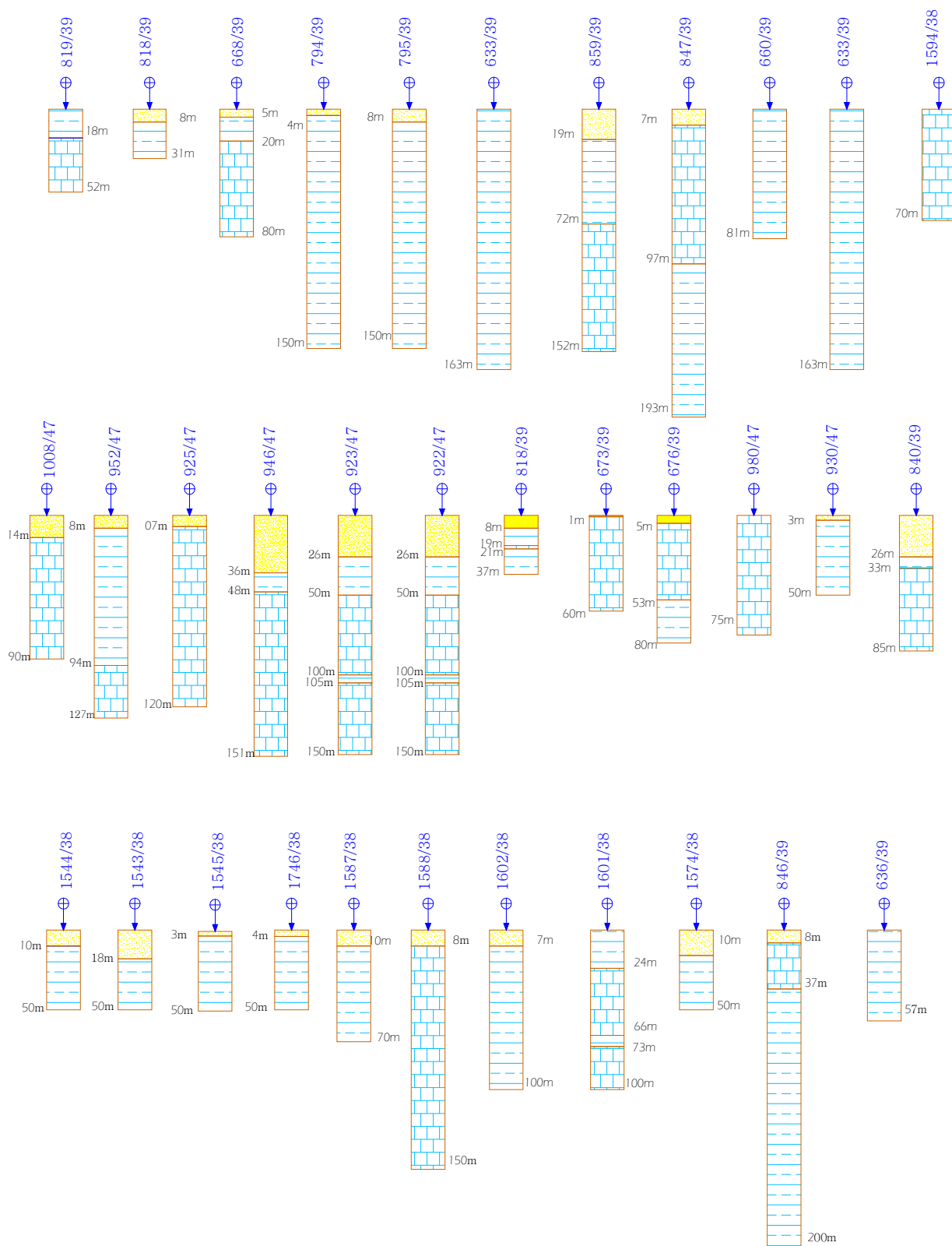
N° Profil géoelectrique	Sondage électrique (SE)	X (m)	Y (m)	Cote TN (m)	Cote du toit du Domérien (m)	Profondeur du toit du Domérien (m)
RG1	SE12	550184	182091	1711	1355	356
RG1	SE11	550903	181539	1655	1138	517
RG1	SE10	550685	180820	1639	1120	519
RG1	SE9	551053	179901	1617	1183	434
RG1	SE8	551789	179617	1602	1322	280
RG1	SE7	552474	178714	1592	1361	231
RG1	SE6	552892	178011	1584	1208	376
RG1	SE5	553503	176849	1572	1198	374
RG1	SE4	553703	175913	1568	1112	456
RG1	SE3	553419	174542	1185	1151	34
RG1	SE2	553753	173857	1300	1272	28
RG1	SE1	553988	173037	1599	1584	15
RG1	SE1BIS	555083	172979	1701	1684	17
RG2	SE18	568710	175587	1375	1355	20
RG2	SE17	569345	176607	1356	1320	36
RG2	SE16	569980	177476	1277	1246	31
RG2	SE5	570515	178346	1184	1128	56
RG2	SE4	571050	179148	1453	1053	400
RG2	SE3	571602	179984	1440	1118	322
RG2	SE2	572923	181974	1402	1014	388
RG2	SE1	573408	182710	1387	745	642
RG2	SE6	573993	183278	1378	728	650
RG2	SE7	574461	183997	1371	689	682
RG2	SE8	575097	184950	1386	625	761
RG2	SE9	575682	185937	1388	926	462
RG2	SE10	576217	186739	1394	691	703
RG2	SE11	576752	187592	1394	818	576
RG2	SE12	577287	188227	1399	929	470
RG2	SE13	577872	189164	1407	1088	319
RG2	SE14	578424	190033	1063	1015	48
RG2	SE15	579310	191505	1607	1012	595
RG3	SE1	578340	197741	1649	1602	47
RG3	SE2	578792	196119	1462	1221	241
RG3	SE3	579093	195216	1431	1193	238
RG3	SE4	579410	194130	1406	1154	252
RG3	SE5	579795	192876	1389	1380	9
RG3	SE6	581166	191237	1413	1059	354
RG3	SE7	581651	190184	1376	1322	54
RG3	SE8	580481	188144	1357	925	432
RG3	SE9	581450	186990	1341	840	501
RG3	SE10	582403	185903	1334	999	335
RG3	SE11	582403	184382	1326	1326	0
RG3	SE12	582754	183312	1367	1367	0
RG3	SE13	583122	182158	1462	1462	0
RG3	SE14	583875	179951	1647	1448	199
RG3	SE15	584309	178312	1431	1025	406
RG3	SE16	584995	176273	1407	797	610
RG3	SE17	586884	175303	1373	830	543
RG3	SE18	586216	173648	1411	1144	267
RG3	SE19	585898	172243	1415	1180	235
RG4	SE14	597293	177435	861	802	59
RG4	SE13	596891	178170	842	809	33

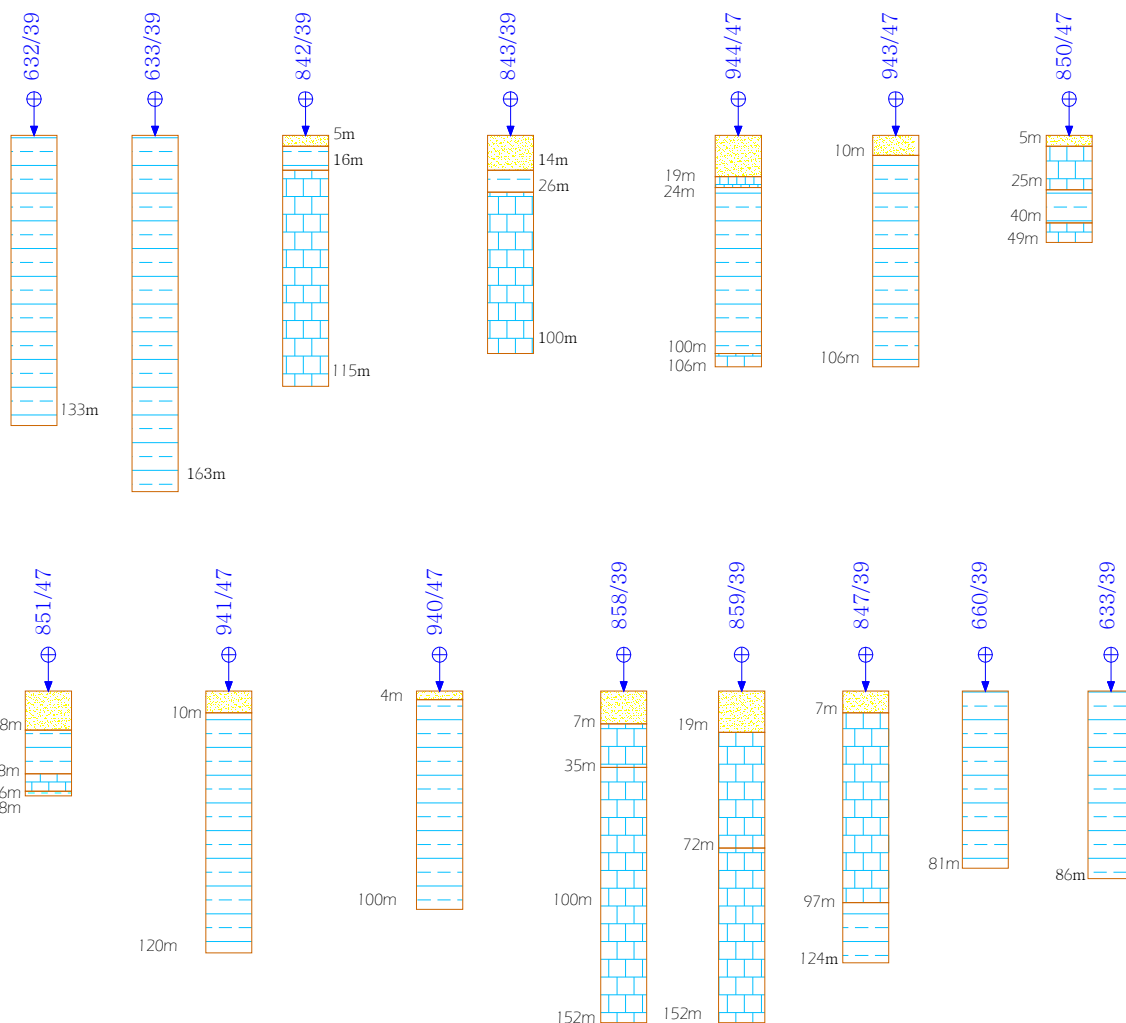
<i>N° Profil géoelectrique</i>	<i>Sondage électrique (SE)</i>	<i>X (m)</i>	<i>Y (m)</i>	<i>Cote TN (m)</i>	<i>Cote du toit du Domérien (m)</i>	<i>Profondeur du toit du Domérien (m)</i>
RG4	SE12	596356	179056	1234	1014	220
RG4	SE11	595621	179876	1243	935	308
RG4	SE10	594617	180862	1253	868	385
RG4	SE9	594166	182434	1254	813	441
RG4	SE8	594918	184323	1201	1124	77
RG4	SE7	594433	185059	1268	1234	34
RG4	SE6	593614	186413	1311	877	434
RG4	SE5-bis	590605	190376	1451	1115	336
RG4	SE5	590906	191396	1420	1093	327
RG4	SE4	590320	191998	1407	1079	328
RG4	SE3	589685	193001	1420	1154	266
RG4	SE2	588565	193068	1411	1177	234
RG4	SE1	589016	194004	1429	1200	229
RG5	SE16	606639	195091	1002	888	114
RG5	SE15	607007	193804	1025	882	143
RG5	SE14	607291	192968	1390	893	497
RG5	SE13	607626	191881	1376	812	564
RG5	SE12	607960	190761	1360	864	496
RG5	SE11	608311	189607	1343	1343	0
RG5	SE10	608562	188804	1338	1011	327
RG5	SE9	608846	187717	1335	1335	0
RG5	SE8	609130	186815	1350	1350	0
RG5	SE7	609482	185678	1350	842	508
RG5	SE6	609431	184808	1326	868	458
RG5	SE5	609013	183922	1330	918	412
RG5	SE4	608829	183103	1347	965	382
RG5	SE3	608177	182033	1363	894	469
RG5	SE2	607876	180779	1400	1061	339
RG5	SE1	607492	179658	1450	1382	68

Annexe 6. Caractéristiques des forages d'essais et transmissivités obtenues par la formule de Dupuits

Réservoir aquifère	Unité	NIRE	Exploitant	X (m)	Y (m)	PT(m)	NP/sol (m)	Débit d'essai (m3/s)	Durée essai (h)	sf (m)	Tr (m ² /s)
Bajocien-Bathnien	Tamdart - Tamagourt	637/39	ONEP	586600	188450	15.2	8.58	1.50E-02	36	49.4	1.08E-03
		1601/38	DRH	561650	184800	100.3	14.16	1.60E-02	24	8.84	6.44E-03
		1612/38	DRH	564260	183108	71.2	7.58	3.20E-02	24	2.12	5.37E-02
		1613/38	Association	572000	182350	120	7.09	2.40E-04	4	60.39	1.40E-05
		852/39	Association	600195	187650	100.8	15.47	3.09E-02	70	14.89	7.38E-03
	Taghzout - Tamtatoucht	920/47	Commune	514801	147750	80.2	11.62	6.65E-03	24	45.38	5.21E-04
		1011/47	Association	522100	157050	103.4	10.46	1.22E-02	48	18.48	2.35E-03
Aaléno-Bajocien	En-Nzala - Tazrouft	647/39	Commune	583550	207000	80.5	4.93	1.00E-01	24	16.8	2.12E-02
	Bou Izarmamuine	1618/38	Commune	545690	194250	80.5	6.1	3.26E-02	48	18.87	6.15E-03
	Igli -Rich	660/39	ONEP	585750	185700	81	0.98	9.22E-03	4	55.81	5.88E-04
		1614/38	Commune	571900	194105	130.5	1054	4.00E-03	24	32.15	4.43E-04
		1615/38	Commune	573950	182955	120.5	10	2.00E-02	0	35.15	2.02E-03
		1619/38	Commune	578600	186050	10.7	9.27	7.14E-03	72	39.3	6.46E-04
	Amgour - Tighattane	856/39	Association	597800	181000	110.5	7.78	1.11E-02	72	19.88	1.99E-03
		877/39	Association	595655	181000	70.5	8.51	2.16E-02	24	15.28	5.02E-03
	Assoul - Ait Hani	1023/47	Association	491805	136500	100.5	24.5	1.03E-02	24	15.1	2.43E-03
	Griyet	1000/47	Association	510295	129500	150.8	13.09	1.00E-02	24	23.12	1.54E-03
		1065/47	Association	508400	129102	120.5	23.54	1.14E-02	6	3.02	1.34E-02
Lias inférieur-Domérien	Lias inférieur-Domérien	289/55	Association	482605	109450	151	23.4	4.50E-02	24	3.48	4.60E-02

Annexe 7. Coupes lithologiques des forages d'eau et d'essais





-  Alluvions et limons (Quaternaire)
-  marnes et marno-calcaires
-  Calcaires, parfois calcaires marneux

Résumé

Le haut Atlas central, considéré comme un des châteaux d'eau du Maroc a connu au cours des dernières années une sécheresse prolongée, qui s'est traduite par un assèchement des puits superficiels et un tarissement de certaines sources. Une étude géo-structurale et hydrogéologique approfondie s'avère donc très utile, surtout quand il s'agit d'une zone très accidentée et peu connue. Au total, la zone renferme 3 complexes aquifères profonds (Lias inférieur-Domérien, Aalénien-Bajocien et Bajocien-Bathonien), subdivisés en 15 unités hydrogéologiques, sous forme des panneaux effondrés. L'analyse de la piézométrie montre un écoulement de direction N-S dans le Lias inférieur-Domérien, dans les autres unités, il prend des directions variables selon l'inclinaison des panneaux aquifères et la position des zones de recharge. L'étude des bilans montre que ces nappes profondes sont en équilibre hydrique. La modélisation hydrodynamique de la nappe superficielle de Rich sous GMS a montrée une hétérogénéité importante en terme de perméabilité (de 10^{-3} à 10^{-5} m/s), des porosités efficaces comprises entre 5% et 25% et des bilans relativement équilibrés. L'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de cette nappe selon DRASTIC et PRK montre une vulnérabilité généralement moyenne.

Mots-clefs : Haut Atlas, Bassins du haut Ziz-Rhérès, Hydrogéologie, modélisation, Vulnérabilité.

Abstract

The central High Atlas of Morocco knew in the last years a prolonged drought, which allowed the drying-out of water wells and some water sources. A detailed geostructural and hydrogeological study then becomes very useful, especially for this area which is very rugged and little recognized. In total, the area contains 3 aquifer complexes (Lower Lias- Domerian, Aalenian-Bajocian and Bajocian- Bathonian) subdivided into 15 hydrogeological. Their most likely geometry is in the form of collapsed panels. The analysis of the piezometry shows a general flow N-S in the lower Lias-Domerian, in the other units, it takes variable directions according to the general inclination of the aquifer panels and the position of the recharge areas. The estimation of groundwater budgets showed that the deep aquifers are relatively balanced. The hydrodynamic modeling developed for the Rich alluvial aquifer shown a significant heterogeneity in terms of permeability (from 10^{-3} to 10^{-5} m/s), effective porosities between 5% and 25% and relatively balanced budgets. The assessment of vulnerability to pollution according to DRASTIC and PRK models shows that the Rich aquifer has a generally medium vulnerability.

Key Words : High Atlas, Upper Ziz-Rhérès basins, Hydrogeology, hydrodynamic modeling, Vulnerability.