

# Qualité des aquifères de la région de Aïn el Atti, amont immédiat de la plaine du Tafilalet (Maroc)

M. AUBOUAZZA<sup>1</sup>, H. DAKKAK<sup>2</sup>, A. ZOUAHRI<sup>2</sup>

(Reçu le 23/07/2020; Accepté le 04/01/2021)

## Résumé

Les présents résultats ont été obtenus dans le cadre du projet salinité (INT/5/144) mené par l'AIEA et l'INRA sur l'utilisation durable des terres salines et des eaux souterraines salées pour la production des cultures tolérantes à la salinité dans la région de Aïn el Atti, plaine de Tafilalet (Maroc). Cette région est soumise à un climat saharien avec moins de 90 mm de précipitations moyennes annuelles, et est caractérisée par l'existence d'un système aquifère multicouches: l'Infracénomien, le Turonien, le Sénonien et le Quaternaire. Un réseau de 20 points d'eau ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques (pH, Température, Conductivité électrique) en vue de suivre l'évolution de la salure, d'identifier son origine et d'estimer la recharge de ces aquifères. Les échantillons d'eau ont été prélevés une fois par trimestre à partir des eaux de surface de l'Oued Ziz et des aquifères du Quaternaire, du Sénonien, du Turonien et de l'Infracénomien. Globalement, on distingue trois types de faciès chimiques: (i) Chloruré-Sodique pour les eaux de surface de l'Oued Ziz, des nappes alluviales sous-jacentes du Quaternaire et des forages artésiens profonds de Aïn el Atti (Infracénomien); (ii) Sulfato-Calcique pour les eaux de l'aquifère Sénonien et (iii) Bicarbonate-Calcique pour les eaux de l'aquifère Turonien. Selon la Classification US Salinity Laboratory Staff (1954), la classe dominante est C5S3-4. Toutefois, la salinité et la sodicité très forte de ces eaux souterraines ne causent ni réduction de la perméabilité, ni accumulation des sels à la surface du sol.

**Mots clés:** Salinité, sodicité, aquifère, Tafilalet, Maroc

## Quality of aquifers in the Aïn el Atti region, immediate upstream of the Tafilalet plain (Morocco)

### Abstract

The present results were obtained with the project IAEA-TC (INT/5/144) on the sustainable utilisation of the saline groundwater and saline lands for plant production in the Aïn el Atti region, Tafilalet plain (Morocco). This region lies within the Saharan climate with less than 90 mm as average annual rainfall. This site is characterized by the existence of a multilayer aquifer's systems: the Infracenomanian, the Turonian, the Senonian and the Quaternary. In this region, a network of 20 water points were set up for the physico-chemical analysis (pH, Temperature, Electrical conductivity) to monitor salinity evolution of the groundwater, identify its origin and estimate the groundwater recharge. Water samples were taken once every three months from the Ziz River, the Quaternary, the Senonian, the Turonian and the Infracenomanian groundwater. Overall, we distinguished between three facies types: (i) Sodium-Chloride for the artesian wells, the Quaternary aquifer and the Ziz river, (ii) Calcium-Sulfate for the Turonian aquifer with the evolution towards Calcium-Chloride and (iii) Calcium-Bicarbonate for the Senonian aquifer. According to the US Salinity Laboratory Staff classification (1954), the dominant class is C5S3-4. However, the high salinity and sodicity of these groundwater does not cause neither reduction of permeability and nor surface soil salt accumulation.

**Keywords:** Salinity, sodicity, aquifer, Tafilalet, Morocco

## INTRODUCTION

Les ressources en eau du bassin hydro-géologiques d'Errachidia-Boudenib sont considérées comme les plus importantes du Tafilalet. Elles sont utilisées pour l'agriculture et pour satisfaire les besoins en eau potable de la région et des communes voisine. En effet, la nappe de Tafilalet a subi une baisse due à la sécheresse et à la surexploitation par endroit. La sauvegarde de la palmeraie du Tafilalet d'environ 15 000 hectares se trouve donc menacée par l'effet conjugué de la sécheresse et de la surexploitation des ressources. Face à ces besoins, de plus en plus accrus, à cause de la croissance rapide de la population et la création de plusieurs périmètres irrigués, le recours à l'usage des eaux souterraines devient très important. Face à cette situation, il devient impératif de penser à une nouvelle compréhension des fonctionnements hydro-dynamiques des nappes et une réévaluation de leurs potentialités en vue d'une gestion optimale. Après exploitation en 1985 de la nappe artésienne Aïn el Atti, qui est située à l'amont immédiat de la plaine du Tafilalet, l'ORMVA/TF s'est intéressé à cette eau dans le but de tirer le meilleur parti malgré sa salinité excessive (14,4 dS/m). Ainsi, des essais de tolé-

rance des cultures à la salinité ont été menés au niveau de la station expérimentale Aïn el Atti, en collaboration avec la SODEA, l'INRA et la société NYPA d'Arizona. Cependant, les eaux souterraines dans cette zone sont souvent de qualité marginale et leur utilisation ne peut manquer de poser de sérieux problèmes de salinité et de sodicité des sols et par conséquent des effets néfastes sur les cultures. Pour parer aux problèmes de qualité des eaux souterraines, qui risquent de nuire aux productions agricoles dans la zone, le projet régional pilote INT/5/144 a été mené dans huit pays (Tunisie, Égypte, Syrie, Iraq, Iran, Pakistan, Myanmar et Maroc), avec l'appui technique et financier de l'Agence International de l'Énergie Atomique. Son principal objectif est l'évaluation et la valorisation des eaux salées de certains aquifères de la zone de Aïn el Atti, en vue d'une gestion optimale et durable.

## CADRE GÉOGRAPHIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDRO-GÉOLOGIQUE

La région de Aïn el Atti est située en amont immédiat de la plaine de Tafilalet, à environ 60 km au Sud de la ville d'Errachidia et à 10 km au Nord d'Erfoud, dans la partie du Sud-Est du Maroc (Figure 1).

<sup>1</sup> Centre de la Recherche Forestière, Rabat, Maroc

<sup>2</sup> Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat, Maroc

Cette plaine est limitée au sud par la plateforme saharienne et au nord par la bassin Crétacé d'Errachidia-Boudenib. Elle est constituée d'une gouttière peu profonde comblée par des dépôts fluviaux du Quaternaire et pratiquement fermée à l'aval et est creusée dans les terrains primaires de l'Anti-Atlas. Les formations qui affleurent sont d'âge Crétacé (Figure 2); elles sont discordantes sur le socle paléozoïque dans la partie méridionale. Par endroit, ces terrains sont recouverts par des dépôts Quaternaires. Les précipitations annuelles mesurées sont faibles et irrégulières, de l'ordre de 129 mm dans la zone nord (Errachidia), moins de 80 mm dans la zone sud (Erfoud) drainant un vaste bassin mieux arrosé en amont, assurent à la nappe de Tafilalet un apport important mais irrégulier en eau de ruissellement. Sur le plan hydrogéologique, le bassin d'Errachidia-Boudenib est constitué d'un système aquifère multicouche composé de quatre niveaux aquifères principaux, logés dans des formations géologiques d'âge Infracénomien, Turonien, Sénonien et Plio-Quaternaire. Ces niveaux aquifères sont plus ou moins communicants entre eux à travers des couches semi-perméables de lithologie détritiques.

### Nappe Infra-cénomaniennne

Cette nappe artésienne, est constituée de grès argileux et de sables gypseux. Elle a pour substratum le Paléozoïque. La qualité des eaux est très variable d'un secteur à l'autre: douce à l'Ouest du secteur d'étude (résidu sec varie entre 0,8 et 1,6 g/l), saumâtre à Aoufous (2 à 3 g/l) et très minéralisée entre Douira et le radier d'Erfoud (le résidu atteint 14,3 g/l). Dans la vallée de Ziz, où l'eau est saumâtre, elle est exploitée par de nombreux puits traditionnels dont le débit maximum ne dépasse pas 2 l/s. Les transmissivités sont faibles et varient entre  $2.10^{-4}$  et  $2,2.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s (DRPE, 1989).



Figure 1: Situation géographique du bassin d'Errachidia-Boudenib

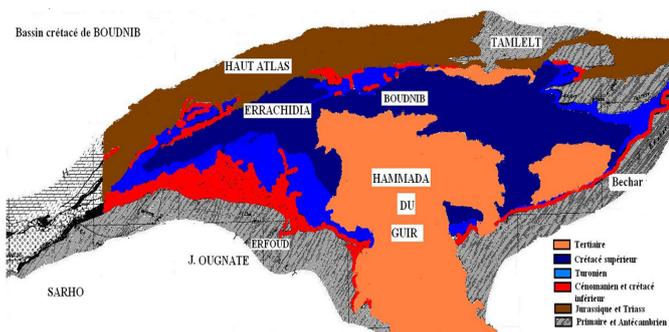


Figure 2: Coupe géologique et hydro-géologique du bassin Crétacé d'Errachidia Boudenib

### Nappe Sénonienne

La nappe du Sénonien est contenue dans des niveaux grésosableux, calcaires et argilo-sableux. La transmissivité est de l'ordre de  $5.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Cette nappe est essentiellement exploitée par les puits traditionnels avec des débits de 2 à 10 l/s. La qualité des eaux est très variable et le résidu sec varie entre 0,5 et 10 g/l. Le sens d'écoulement général est du Nord vers le Sud, avec des axes de circulation préférentiels de même direction que ceux du Turonien. Ces axes convergent vers les sources de Meski, Aoufous et Tarda, ce qui indique que le Sénonien est drainé par ces sources.

### Nappe Turonienne

La nappe du Turonien est formée essentiellement de calcaires dolomitiques fracturés d'une épaisseur de 100 m. Dans la vallée du Ziz, outre les puits traditionnels, cette nappe est exploitée par des stations de pompage collectives, avec des débits variant entre 60 et 100 l/s. Hormis certains forages présentant des salinités croissantes avec la profondeur, le résidu sec varie entre 1 et 2 g/l. Le sens général de l'écoulement se fait du Nord vers le Sud. Ses exutoires naturels sont présentés par les sources, qui contribuent dans le développement agricole.

### Nappe Plio-Quaternaire

Cette nappe se cantonne essentiellement au lit majeur des oueds. Sa surface est à moitié occupée par des palmeraies. Du fait de l'hétérogénéité des formations quaternaires, les caractéristiques hydro-dynamiques de cet aquifère sont très variées. L'exploitation par puits traditionnels commencée depuis plusieurs années, s'est intensifiée dernièrement par la mise en marche de nombreuses stations de pompage privées et collectives dont le débit d'exploitation varie de 20 à 70 l/s. La recharge est essentiellement assurée par les eaux de crues dans la rivière et les précipitations. La profondeur de l'eau de la nappe varie de 4 à 15 m et son épaisseur saturée est de 10 m en moyenne avec une transmissivité de  $3.10^{-3}$  à  $9.10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

Une quinzaine de campagnes de suivi et d'échantillonnage ont été organisées chaque trimestre dans la zone du projet, la première datant du 20/5/1997. Ces missions trimestrielles effectuées ont fait l'objet de mesures suivantes:

- Mesure des niveaux piézométrique (Sonde piézométrique manuelle);
- Dosage *in situ* de la salinité, indirectement par la mesure de la conductivité électrique (Conductimètre type WTW LF 320/SET);
- Dosage de l'alcalinité (pH-mètre de terrain WTW LF 320/SET);
- Prélèvement d'échantillons d'eaux en vue d'analyses chimiques (échantillonneur des eaux souterraines).

Le choix du réseau des points d'eau (20) a été effectué selon des radiales dans le sens des écoulements des eaux souterraines aux alentours de la station expérimentale (Figure 3). Les analyses chimiques des cations et des anions ont été réalisées au laboratoire du Département du Milieu Physique de l'INRA-Unité de Recherche sur l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles et du Service des Expérimentations, des Essais et de la normalisation relevant de l'Administration du Génie Rural.

## RÉSULTATS

### Analyses physiques

Les paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain montrent que: **(i)** la température des eaux souterraines de la région de Aïn el Atti varie entre 16,0 et 24,4 °C, la corrélation de la température des eaux avec les profondeurs de captage ne montre pas une relation très nette. Mais d'une façon générale, ces températures montrent que les eaux de forages profonds sont supérieures à 20 °C et que les eaux de puits de surface sont inférieurs à 21 °C. Ceci montre que la température des eaux est liée essentiellement à celle de l'air. **(ii)** les valeurs de pH enregistrées sont généralement neutres pour les eaux du Turonien, des aquifères de surface et de l'Oued Ziz (6,60-7,50) et plutôt acides (5,60-6,74) dans le cas des eaux profondes artésiennes. **(iii)** la salinité des eaux souterraines mesurée directement à l'aide de la conductivité électrique (Figure 4a,b) varie globalement entre 2,5 dS/m pour les eaux de la nappe alluviale et 14,4 dS/m dans le cas des eaux artésiennes de Aïn el Atti. Un maximum de conductivité électrique est enregistrée dans la partie sud du secteur (plaine du Tafilalet).

### Hydro-chimie

#### Faciès chimique

Les résultats des analyses chimiques, acquises au cours des missions d'échantillonnage, ont été portées sur le diagramme de Piper afin de déterminer les faciès chimiques caractérisant les différents aquifères de la région de Aïn el Atti. Globalement, on distingue trois types de faciès chimiques (Figure 5):

- Faciès chloruro-sodique pour les eaux des forages artésiens, des eaux de la nappe alluviale, et de rivière de l'Oued Ziz (Figure 5a), sulfato-calcique, pour les eaux de puits "SGW7" et "SGW8" (Figure 5b) et bicarbonaté, pour les eaux du puits "SGW9" (Figure 5c).

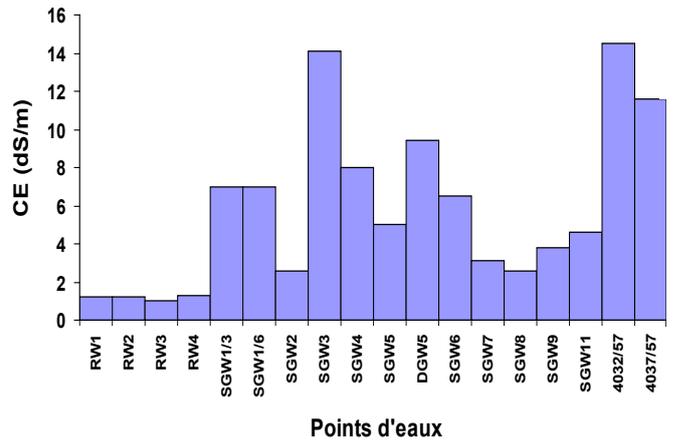


Figure 4a: Histogramme des conductivités électriques des eaux de la région de Aïn el Atti (période de hautes eaux)

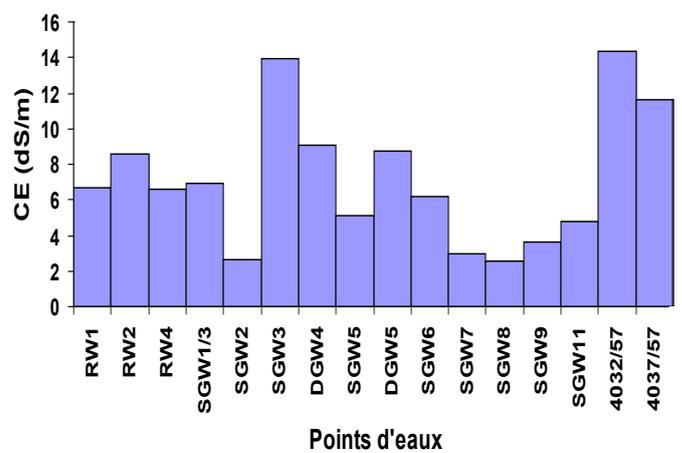


Figure 4b: Histogramme des conductivités électriques des eaux de la région de Aïn el Atti (période de basses eaux)

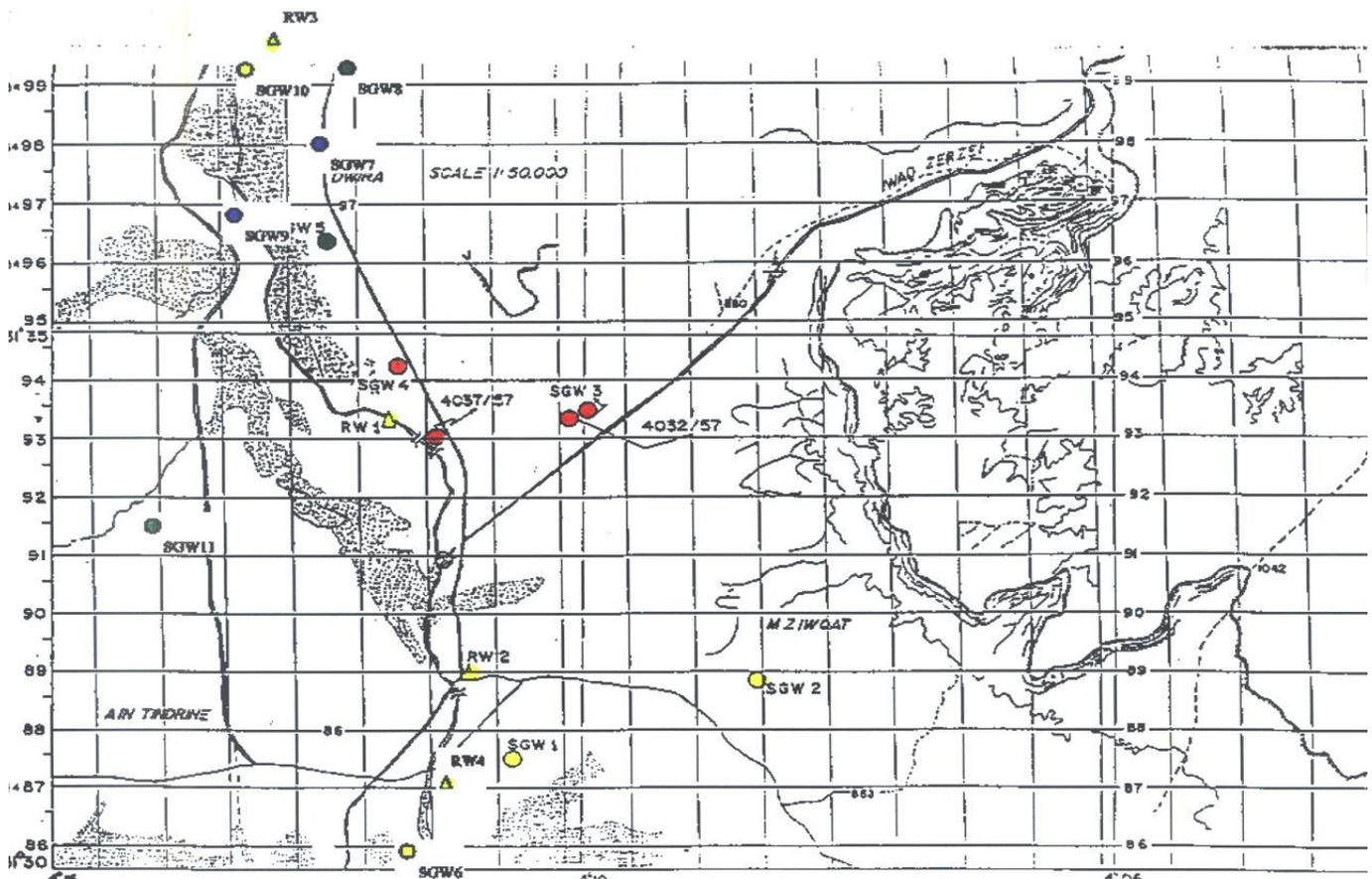


Figure 3: Localisation du réseau des points d'eaux suivis

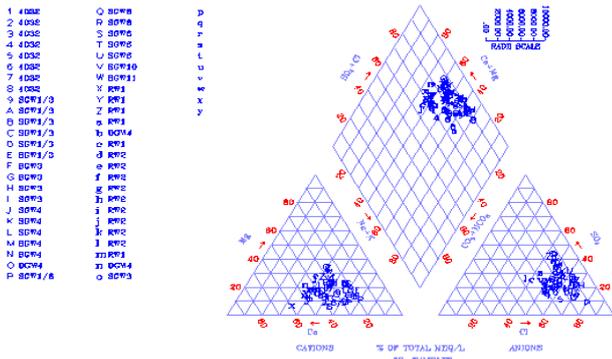


Figure 5a: Faciès chloruro-sodique

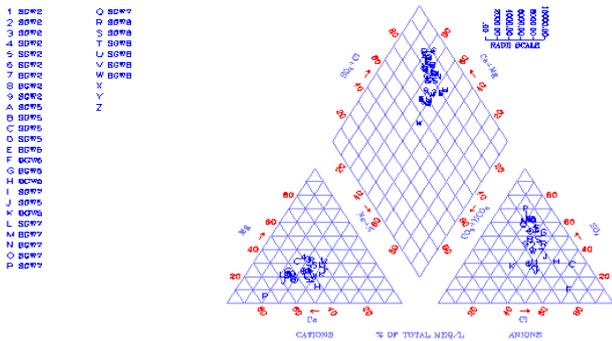


Figure 5b: Faciès sulfato-calcique

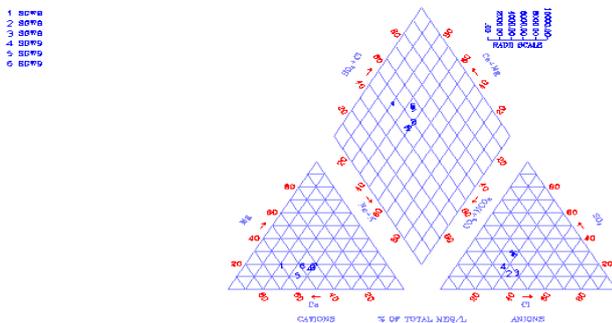


Figure 5c: Faciès bicarbonaté-calcique

**Origine de la minéralisation**

Les figures 6a, 6b et 6c, qui reproduisent respectivement les variations des normalités des ions  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{++}$  et  $Ca^{++}$  en fonction des chlorures, indiquent une corrélation possible entre  $Na^+$  et  $Cl$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$  et  $Cl$ . Par contre, la variation de  $Ca^{++}$  et de  $Mg^{++}$  en fonction de  $Cl$ , plus complexe permet de distinguer deux domaines:

- Un domaine riche en chlorure où les teneurs de  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  fluctuent indépendamment du chlore. C'est le cas des forages artésiens "Infracénomien" Aïn el Atti "4032/57", "4037/57" et "SGW 1/6".

La figure 6d atteste d'une forte corrélation entre les domaines de  $Ca+Mg+Na+K$  et  $Cl$ . L'ensemble des données plaident en faveur d'une dissolution des chlorites et du gypse. Ceci est d'ailleurs supporté par:

- Des rapports  $Log [Mg^{++}]/[H^+]$  très élevés;
- Une variation de  $[Ca^{++}+Mg^{++}/SO_4] f [Na^+/Cl=1]$  reportée sur la figure 6e, où la majeure partie des points fluctuent autour de  $Na/Cl = 1$ . Ce qui indique une chimie de l'eau contrôlée par les processus de dissolution des chlorites et du gypse.

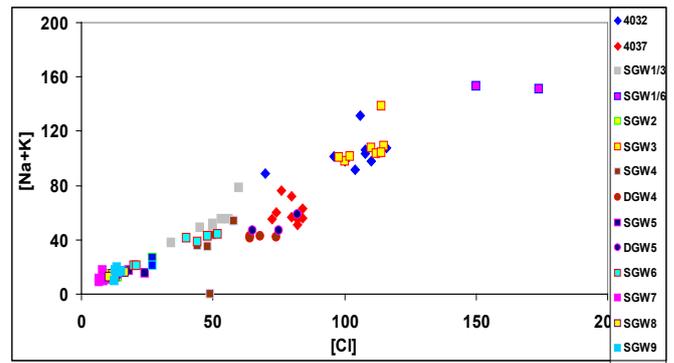


Figure 6a:  $[Na^+ + K^+] f [Cl]$

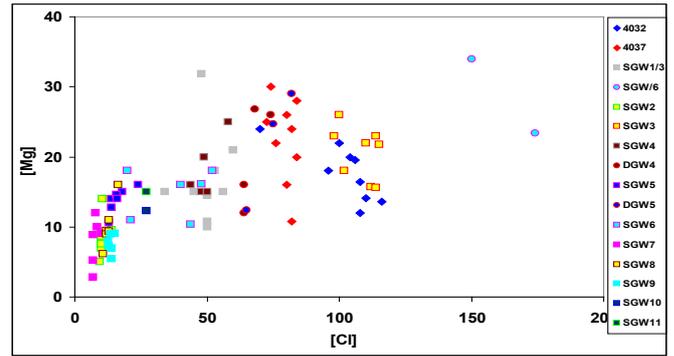


Figure 6b:  $[Mg] f [Cl]$

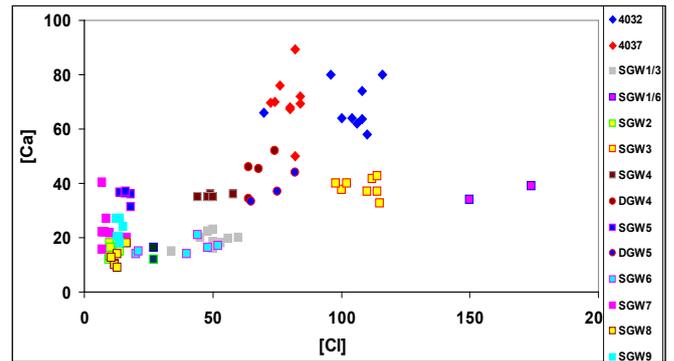


Figure 6c:  $[Ca] f [Cl]$

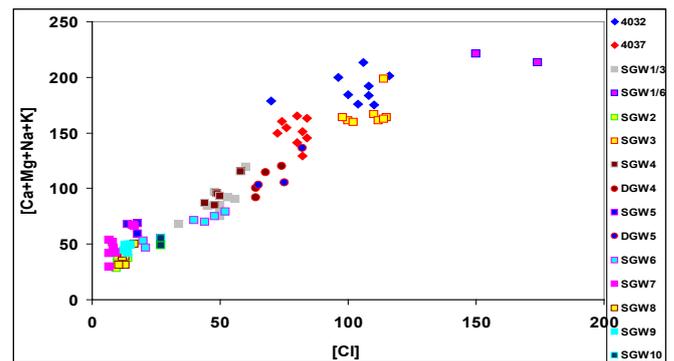


Figure 6d:  $[Ca+Mg+Na+K] f [Cl]$

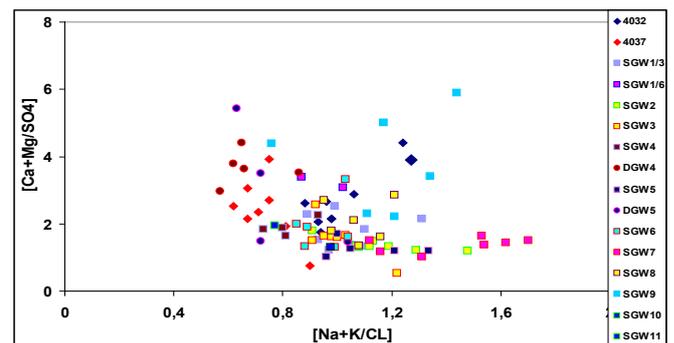


Figure 6e:  $[Ca+Mg/SO_4] / [Na+K/Cl]$

### Alcalinité des eaux souterraines

Sur la base des valeurs du SAR, la valeur minimale enregistrée est de 2,03 (meq/l)<sup>1/2</sup> et la valeur maximale est de 26,3 (meq/l)<sup>1/2</sup>. La nappe artésienne Aïn el Atti présente des risques d'alcalinité élevées, ce qui montre l'effet des eaux artésiennes, chargée en sodium, utilisées pour l'irrigation dans cette zone. La relation entre le SAR et la conductivité électrique (CE) est bonne ( $y = 0,0011x + 0,0714$ ,  $R^2 = 77\%$ ) et permet d'estimer l'alcalinité des eaux souterraines à partir des valeurs de la CE. Ainsi, ce sont les eaux les plus salées qui présentent le risque de sodification le plus fort. La mesure de la CE et du SAR ont permis de classer les eaux souterraines échantillonnées selon le diagramme de classification Américaine proposé par USSL Riverside en 1954 (Figure 7). Cette classification montre que les eaux souterraines représentent un danger d'alcalinisation faible ( $S_1$ : 4%) à moyen ( $S_2$ : 38 %).

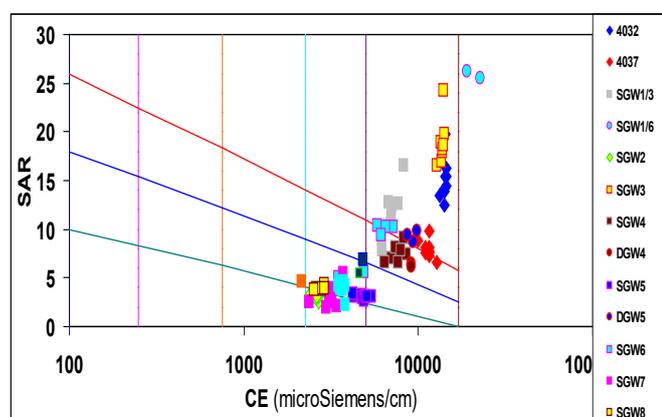


Figure 7: Qualité de l'eau d'irrigation

Toutefois, on note une dominance des classes C5S3 (30 %) et C5S4 (27 %). L'utilisation de la figure 8, établie par Rhoades (1977), permet d'affecter à chaque eau un effet relatif sur la vitesse d'infiltration. Elle montre que pour toutes les eaux analysées, le risque de réduction de la vitesse est nul.

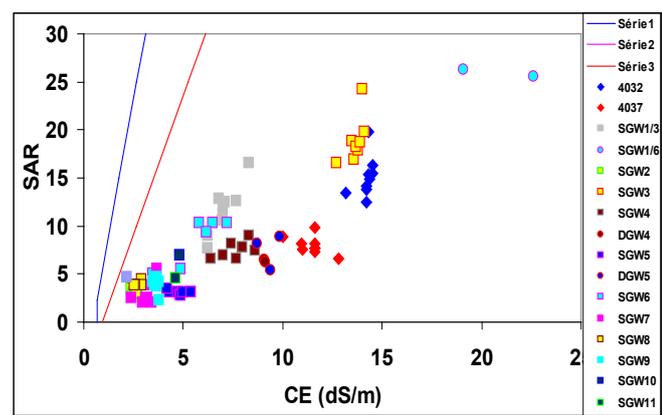


Figure 8: Effet relatif de la salinité et du coefficient d'adsorption du sodium sur la vitesse d'infiltration

### CONCLUSION

L'étude réalisée a montré que le degré de salinité et les faciès chimiques des eaux varient d'un aquifère à l'autre et dépendent directement de la nature lithologique de leurs substrats et des types d'interaction fluides-minéral.

Pour la salinité, excepté les eaux des forages profonds artésiens "Infracénomaniens", qui sont fortement salées, on note pour les autres aquifères "Sénonien, Turonien, et Quaternaire", que la salinité est moyenne à faible;

Pour les faciès chimiques des eaux, on distingue globalement trois types:

(i) **Chloruré-Sodique** dominant pour les eaux de surface de l'Oued Ziz, des nappes alluviales et Quaternaire et des forages artésiens Aïn el Atti (Infracénomaniens);

(ii) **Bicarbonaté-Calcique** pour les eaux de l'aquifère Turonien et;

(iii) **Sulfato-Calcique** dans le cas des eaux de l'aquifère Sénonien. Les teneurs relativement élevées en Ca-Mg peuvent s'expliquer par la dissolution des calcaires dolomitiques, d'anhydrites et du Gypse ( $\text{CaSO}_4$ ).

Les interactions enregistrées dépendent du degré de salinité et de la nature des faciès chimiques.

Les ions [Na] et [K] sont fortement corrélés avec les chlorures. En revanche, pour les ions [Ca] et [Mg] on distingue entre deux domaines selon la concentration des chlorures:

- Un domaine à  $[\text{Cl}] < 9.10^{-3}$  moles où  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Ca}^{++}$  sont fortement corrélés;

- Un domaine riche en chlorures où les teneurs de Mg et Ca fluctuent indépendamment du chlore (puits 4032/57, 4037/57).

L'ensemble des données plaide en faveur de la dissolution des halogénures. Ceci serait d'ailleurs supporté par:

- Des rapports  $\text{Log} [\text{Mg}]/[\text{Cl}]$  très élevés;

- Une variation de  $[\text{Mg}]+[\text{Ca}]/[\text{SO}_4]=f([\text{Na}]/[\text{Cl}])$  rapportée sur la figure 6d, où la majeure partie des points fluctuent légèrement autour de  $\text{Na}/\text{Cl}=1$ , ce qui indique une chimie de l'eau contrôlée par les processus de dissolution des halogénures et du gypse;

- Indice de saturation: les eaux sont toutes saturées en calcite, excepté les points d'eau de surface. De même, la saturation en dolomie est générale sauf à RW1-4, SGW2, SGW6, SGW7 et SGW8 (eau de surface, Quaternaire et du Sénonien). Par contre, la solubilisation des formations gypsifères est loin d'être négligeable dans la chimie des eaux des points (excepté les eaux de surface).

Selon la classification US Salinity Laboratory Staff (1954), la classe dominante est  $\text{C}_5\text{S}_{3,4}$ , ces eaux présentent un fort risque de salinisation et de sodification. Toutefois, la salinité et la sodicité très forte de ces eaux souterraines ne causent ni réduction de la perméabilité, ni accumulation de sel à la surface du sol.

### RÉFÉRENCE

Amharref A. (1991). Contribution à l'étude hydro-géologique de la vallée du Ziz (Province d'Errachidia); Sud-Est du Maroc). Incidences respectives de la sécheresse et du barrage Hassan Addakhil sur les ressources en eau à l'aval. Doctorat de l'Université de Franche-Comté, 232 p.