



Université Cadi Ayyad  
Faculté des Sciences et Techniques Marrakech, Département des Sciences de la  
Terre, Laboratoire Géoressource, Unité de Recherche Associée CNRST  
(URAC 42) Maroc

.....  
**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**  
**MASTER es SCIENCES ET TECHNIQUES**

« Eau et Environnement »

Intitulé :

**Etude du fonctionnement hydrogéologique des  
bassins versants de Rhéraya, Ourika et Zat  
(Tensift\_Marrakech, Maroc) :  
Hydrochimie isotopique**

**Présenté par :** Hind HADDANI

**Encadrée par :** RAIBI. F  
BENKADDOUR.A

**Soutenu le 30 juin 2012**

**Membres de jury :**

**Mr. BENKADDOUR**  
**Mlle. RAIBI**  
**Mr. CHAFIKI**  
**Mr. RHOUJJATI**  
**Mr. JARLAN**

**Professeur FST Marrakech**  
**Cadre supérieur CNESTEN**  
**Professeur FST Marrakech**  
**Professeur FST Marrakech**  
**Directeur LMI Marrakech**

**Encadrant**  
**Encadrant**  
**Examineur**  
**Examineur**  
**Examineur**

Année universitaire 2011-2012

# *Je dédie ce mémoire*

*A mes chers parents*

*A mon frère Adnane*

*A toute la famille*

*A mes frères et sœurs ami(e)s*

*A Tous ceux qui me sont chers.*

## **REMERCIEMENTS**

---

*Au terme de la rédaction de ce mémoire, c'est un devoir agréable d'exprimer en quelques lignes la reconnaissance que je dois à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail, qu'ils trouvent ici mes vifs respects et ma profonde gratitude.*

*Je présente mes profonds respects et mes reconnaissances à **Mr. MARAH Hamid**, chef d'unité Eau et Climat au CNESTEN, pour les moyens qu'il a mis à ma disposition pour pouvoir accomplir mon stage au sien de cet établissement dans les meilleures conditions.*

*Je tiens à remercier **Mr. BENKADDOUR Abdelfattah**, professeur de la faculté des Sciences et Techniques de Marrakech pour son encadrement fructueux, sa générosité, son suivi au cours de mon stage malgré la distance entre Kenitra et Marrakech. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance.*

*Par la même volonté et la même chaleur, je tiens à remercier **Mlle. RAIBI Fatima**, cadre supérieure au CNESTEN, qui a suivi ce travail dans tous ces détails avec une rigueur scientifique exceptionnelle, ce qui m'a donné le courage pour poursuivre la réalisation de ce projet de recherche. Elle a su me faire partager son expérience et son intérêt pour la recherche à travers de conseils et d'échanges amicaux.*

*Un grand merci à **Mr. KHABBA Saïd**, professeur à la faculté des Sciences Semlalia et directeur du Laboratoire Mixte International (LMI), et à **Mr. JARLAN Lionel**, chargé des recherches au Centre d'Etudes Spatiales CESBIO, pour leur disponibilité permanente et leur soutien au cours de mon stage*

*Je ne pourrais oublier les conseils de **Mme. EL BOUZIDI Salîha**, responsable du laboratoire d'analyses physico-chimique, et **Mr. TAOUS Fouad** responsable du laboratoire d'analyses des isotopes stables au CNESTEN, qui m'ont été d'une grande utilité. Je tiens à les remercier profondément pour l'aide efficace qu'ils m'ont toujours apportée, leurs critiques et leurs remarques ont largement contribué à l'aboutissement de mon travail.*

*J'adresse mes plus sincères remerciements aux membres de Jury, **Mr. CHAFIKI Driss**, **Mr. RHOUJJATI Ali**, Professeurs de la faculté des Sciences et Techniques de Marrakech et **Mr. JARLAN Lionel**, chargé de recherche au Centre d'Etudes Spatiales CESBIO, d'avoir accepté de juger mon travail.*

*Je n'oublierai jamais la gentillesse et l'amabilité de tout le personnel de L'unité Eau et Climat au CNESTEN, **EL Ghalî Tibari**, **EL MOUQRANI Loubna**, **Radouane SAADI**, **EL YAHYAOUI Adil** et **GHASSAN Acil**, pour leur collaboration fructueuse, leurs aides et aussi pour leurs remarques et suggestions utiles. Grâce à eux, l'atmosphère a toujours été amicale et détendue.*

*Enfin, merci à mes parents, pour m'avoir donné le gout et l'ambition de faire des études, ainsi Qu'à tous les professeurs qui, au cours de ma scolarité du primaire au Master, m'ont fait aimer les Sciences et plus particulièrement celles de l'eau et de l'environnement.*

# Résumé

Le bassin Tensift est situé dans un contexte climatique aride à semi aride avec une morphologie complexe. Contenant le haut Atlas, la plaine du Haouz et le massif des Jbilet. La quantité de l'eau disponible est faible et variable dans l'espace et dans le temps. En plus de la rareté de l'eau et de son inégale répartition, due à l'effet des changements climatiques observée à l'échelle planétaire, la région est soumise à une demande croissante en eau. Pour accompagner cette situation préoccupante, une gestion durable des ressources en eaux s'impose et exige la mise au point d'un plan d'exploitation.

L'objectif de ce travail de master est de comprendre les modalités de fonctionnement hydrogéologique des bassins versants de Rhéraya, Ourika et Zat. L'étude hydrochimique et isotopique entreprise ont montré qu'au niveau du bassin de Rhéraya et Ourika, les eaux ont pris leurs origines en hautes altitudes dans un contexte géologique fissuré où elles circulent rapidement, confirmé par la relation oxygène-18/deutérium qui traduit le régime atlantique des précipitations sans évaporation qui suggère une infiltration rapide, et présentent une minéralisation faible. Alors qu'au niveau du bassin de Zat, les eaux ont pris également leur origine en hautes altitudes sur deux formations de lithologie différentes, d'où la minéralisation importante des eaux.

---

Tensift basin is located in a climate arid to semi arid with a complex morphology. Containing the high Atlas, the Haouz and massive Jbilet. The amount of water available is low and variable in space and time. In addition to water scarcity and its unequal distribution, due to the effect of climate change observed globally, the region is subjected to an increasing demand for water. To accompany this worrying situation, the sustainable management of water resources is essential and requires the development of a business plan.

The objective of this master thesis is to understand the operating procedures hydrogeological watershed Rheraya, Ourika and Zat. The study hydrochemical and isotopic company have shown the basin and Ourika Rheraya, the waters took their origin at high altitudes in a geological context in which they circulate quickly cracked, confirmed by the relationship that translates oxygen-18/deuterium Atlantic rainfall regime without evaporation suggesting a rapid infiltration, and have a low mineralization. While in the pelvis of Zat, the waters have also taken their origin at high altitudes on two different lithology formations, hence the significant mineralization of the waters.

## Mots clés :

Hydrogéologie, Rhéraya, Ourika, Zat, isotopie, hydrochimie, minéralisation, altitude de recharge, bassin Tensift.

# Sommaire

Introduction générale.....	10
Présentation de l'établissement d'accueil (CNESTEN).....	12

## **Chapitre I : Présentation de la zone d'étude**

<b>I. Présentation du cadre général.....</b>	<b>16</b>
<b>I.1. Bassin versant de Tensift.....</b>	<b>16</b>
<i>I.1.1. Situation géographique.....</i>	<i>16</i>
<i>I.1.2. Cadre climatologique.....</i>	<i>18</i>
<i>I.1.3. Végétation.....</i>	<i>19</i>
<i>I.1.4. Cadre géologique.....</i>	<i>19</i>
<i>I.1.5. Cadre hydrogéologique.....</i>	<i>21</i>
<b>II. Présentation de la zone d'étude.....</b>	<b>24</b>
<b>II.1. Présentation du bassin de Rhéraya.....</b>	<b>24</b>
<i>II.1.1. Situation géographique.....</i>	<i>24</i>
<i>II.1.2. Cadre climatique et hydrologique.....</i>	<i>25</i>
<i>II.1.3. Végétation.....</i>	<i>27</i>
<i>II.1.4. Cadre géologique.....</i>	<i>28</i>
<b>II.2. Présentation du bassin d'Ourika.....</b>	<b>30</b>
<i>II.2.1. Situation géographique.....</i>	<i>30</i>
<i>II.2.2. Cadre climatique et hydrologie.....</i>	<i>32</i>
<i>II.2.3. Végétation.....</i>	<i>33</i>
<i>II.2.4. Cadre géologique.....</i>	<i>33</i>
<b>II.3. Présentation du bassin de Zat.....</b>	<b>35</b>
<i>II.3.1. Situation géographique.....</i>	<i>35</i>
<i>II.3.2. Cadre climatique et hydrologique.....</i>	<i>36</i>
<i>II.3.3. Cadre géologique.....</i>	<i>38</i>

## **Chapitre II : Généralités sur l'hydrochimie et l'isotopie des eaux**

<b>I. Revue bibliographique sur le terme d'isotopie.....</b>	<b>41</b>
<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>41</b>
<b>II.2. Techniques isotopiques.....</b>	<b>41</b>
<i>II.2.1. Isotopes stables concept et terminologie.....</i>	<i>41</i>
<i>II.2.2. Isotopes stables : cas de <math>^{18}\text{O}</math>, <math>^2\text{H}</math> et <math>^{13}\text{C}</math>.....</i>	<i>45</i>
<i>II.2.3. Isotopes radioactifs : Tritium et Carbone-14.....</i>	<i>47</i>
<i>II.2.4. Application de la relation: <math>\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}</math>.....</i>	<i>48</i>

II.2.5. Les applications des isotopes de l'eau.....	55
<b>II. Les concepts de base de géochimie.....</b>	<b>56</b>
<b>II.1. Généralités.....</b>	<b>56</b>
<b>II.2. Rappels des principes de base de géochimie.....</b>	<b>56</b>
II.2.1. Adsorption.....	56
II.2.2. Echange ionique.....	57
II.2.3. Indice de saturation.....	57

## **Chapitre III : Matériels et méthodes**

<b>I. Echantillonnage et méthodologie analytique.....</b>	<b>60</b>
<b>I.1. Echantillonnage.....</b>	<b>60</b>
<b>I.2. Analyses physico-chimiques de l'eau.....</b>	<b>62</b>
I.2.1 Mesure du pH, conductivité et alcalinité sur le terrain.....	62
I.2.2. Analyses chimiques des eaux.....	62
I.2.3. Dosage des ions majeurs par chromatographie ionique.....	66
<b>I.3. Analyses des isotopes stables (Oxygène-18, Deutérium).....</b>	<b>67</b>
<b>I.4. Analyses des isotopes radioactifs.....</b>	<b>69</b>

## **Chapitre IV : Résultats et discussions**

<b>II. Résultats et discussion.....</b>	<b>72</b>
<b>II.1. Caractérisation chimique et isotopique des eaux du bassin de Rhéraya.....</b>	<b>72</b>
II.1.1. Caractérisation physique des eaux.....	72
II.1.2. Caractérisation hydro-chimique des eaux.....	72
II.1.3. Traçage des eaux souterraines du bassin de Rhéraya par le couple $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ .....	79
II.1.4. Conclusion.....	83
<b>II.2. Caractérisation chimique et isotopique des eaux du bassin d'Ourika.....</b>	<b>84</b>
II.2.1. Caractérisation physique des eaux.....	84
II.2.2. Caractérisation hydro-chimique des eaux.....	84
II.2.3. Traçage des eaux souterraines du bassin d'Ourika par le couple $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ .....	91
II.2.4. Conclusion.....	93
<b>II.3. Caractérisation chimique et isotopique des eaux du bassin de Zat.....</b>	<b>94</b>
II.3.1. Caractérisation physico-chimique des eaux.....	94
II.3.2. Caractérisation hydro-chimique des eaux.....	94
II.3.3. Traçage des eaux souterraines du bassin de Zat par le couple $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ .....	99
II.3.4. Conclusion.....	102
Annexe 1.....	104
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>108</b>

# Listes des figures

## Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

<b>Figure 1</b> : Situation du bassin du Tensift, au sud du Maroc.....	11
<b>Figure 2</b> : Présentation des neuf sous-bassins atlasiques du bassin du Tensift. La ligne de partage climatique est en pointillés (Chaponniere, 2005).....	12
<b>Figure 3</b> : Carte piézométrique de la nappe de Haouz (DRPE, 1988).....	18
<b>Figure 4</b> : Situation géographique du bassin de Rhéraya.....	19
<b>Figure 5</b> : Réseau hydrographique du bassin Rhéraya avec ses quatre sous-bassins (Chaponniere 2005).....	20
<b>Figure 6</b> : Variation des précipitations annuelles a Tahanaout (1970 - 2001) (Haloui 1986).....	21
<b>Figure 7</b> : Carte géologique du Rhéraya (Extraite de carte géologique de Marrakech au 1/500 000).....	23
<b>Figure 8</b> : Situation géographique du bassin d'Ourika.....	25
<b>Figure 9</b> : Le réseau hydrographique du bassin versant de l'Ourika (Saidi, 2006).....	27
<b>Figure 10</b> : Variations mensuelles des précipitations et des écoulements à la station d'Aghbalou. (Saidiet al., 2006).....	28
<b>Figure 11</b> : La carte géologique du bassin versant de l'Ourika (Extraite de carte géologique de Marrakech au 1/500 000).....	29
<b>Figure 12</b> : Situation géographique du bassin versant du Zat.....	31
<b>Figure 13</b> : Réseau hydrographique du bassin de Zat (ABH Tensift).....	32
<b>Figure 14</b> : Précipitation moyenne mensuelle à la station de Taferiat (Ramromi, 2007) .....	33
<b>Figure 15</b> : Précipitation moyenne annuelle à la station de Taferiat (Ramromi, 2007).....	33
<b>Figure 16</b> : Carte géologique du bassin versant de l'oued Zat (Extraite de carte géologique de Marrakech au 1/500 000) .....	34

## Chapitre II : Généralités sur l'hydrochimie et l'isotopie des eaux

<b>Figure 17</b> : les isotopes de la molécule d'eau .....	37
<b>Figure 18</b> : Cycle de l'eau avec les variations des teneurs isotopiques.....	43
<b>Figure 19</b> : Relation Deutérium ( $^2\text{H}$ ) et Oxygène-18 ( $^{18}\text{O}$ ) (Craig, 1961).....	44
<b>Figure 20</b> : Relation Oxygène_18-Température (Dangaard, 1964).....	45
<b>Figure 21</b> : Relation $\delta^{18}\text{O}$ –Précipitations (Blavoux ,1978).....	47
<b>Figure 22</b> : Droite de Marcé (Marcé, 1975).....	48

<b>Figure 23</b> : Distribution mondiale des teneurs en $^{18}\text{O}$ des précipitations (AIEA,OMM) d'après Yutsever et Gat (1981) .....	49
<b>Figure 24</b> : Schéma illustrant l'appauvrissement de la vapeur et des précipitations quand une masse d'air se dirige vers les pôles .....	50

### **Chapitre III : Matériels et méthodes**

<b>Figure 25</b> : Localisation des points échantillonnés dans la zone d'étude .....	55
<b>Figure 26</b> : Schéma général d'un chromatographe ionique.....	60

### **Chapitre IV : Résultats et discussions**

<b>Figure 27</b> : Corrélations entre $\text{Ca}^{2+}$ et $\text{SO}_4$ des eaux souterraines du bassin Rhéraya.....	67
<b>Figure 28</b> : Corrélations entre $\text{Cl}^-$ et $\text{Na}^+$ des eaux souterraines du bassin Rhéraya.....	68
<b>Figure 29</b> : Corrélations entre $\text{Ca}^{2+}$ et $\text{Mg}^{2+}$ des eaux souterraines du bassin Rhéraya.....	69
<b>Figure 30</b> : Espace des variables.....	69
<b>Figure 31</b> : Espace des individus.....	69
<b>Figure 32</b> : Présentation du facies chimique des eaux du bassin de Rhéraya.....	71
<b>Figure 33</b> : Relation oxygène-18 - Deutérium dans les eaux de l'oued Rhéraya.....	73
<b>Figure 34</b> : Relation oxygène-18 - Deuterium dans les eaux souterraines et de l'oued du bassin Rhéraya.....	73
<b>Figure 35</b> : Relation entre $\text{Cl}^-$ et la teneur $^{18}\text{O}$ des eaux de l'oued Rhéraya.....	74
<b>Figure 36</b> : Relation entre $\text{Cl}^-$ et la teneur $^{18}\text{O}$ des eaux souterraines du bassin Rhéraya....	74
<b>Figure 37</b> : Relation entre $^{18}\text{O}$ et les altitudes des points d'eau souterraine du bassin Rhéraya.....	75
<b>Figure 38</b> : Relation entre Deutérium et les altitudes des points d'eau souterraine du bassin Rhéraya .....	75
<b>Figure 39</b> : Relation oxygène-18 et altitude de recharge.....	76
<b>Figure 40</b> : Espace des variables.....	79
<b>Figure 41</b> : Espace des individus.....	79
<b>Figure 42</b> : Corrélacion entre $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ .....	80
<b>Figure 43</b> : Corrélacion entre $\text{Na}^+$ , $\text{Cl}^-$ .....	81
<b>Figure 44</b> : Corrélacion entre $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ .....	82
<b>Figure 45</b> : Présentation diagramme pour les eaux du bassin Ourika.....	83
<b>Figure 46</b> : Relation oxygène-18 - Deutérium dans les eaux souterraines du bassin Ourika.	84
<b>Figure 47</b> : Corrélacion entre les teneurs en $^{18}\text{O}$ et les teneurs en $\text{Cl}^-$ des eaux souterraines du bassin Ourika.....	85

<b>Figure 48</b> : Relation $^{18}\text{O}$ avec les latitudes des points d'eau souterraine.....	85
<b>Figure 49</b> : Relation Deutérium avec l'altitude des points d'eau souterraine.....	85
<b>Figure 50</b> : Relation oxygène-18 et altitude .....	86
<b>Figure 51</b> : Espaces des variables.....	88
<b>Figure 52</b> : Espace des individus.....	88
<b>Figure 53</b> : Corrélation entre $\text{Ca}^{2+}$ et $\text{SO}_4$ .....	89
<b>Figure 54</b> : Corrélation entre $\text{Na}^+$ et $\text{Cl}^-$ .....	89
<b>Figure 55</b> : Corrélation entre $\text{Ca}^{2+}$ et $\text{Mg}^{2+}$ .....	89
<b>Figure 56</b> : Représentation des eaux dans le diagramme de Piper.....	91
<b>Figure 57</b> : Relation oxygène-18 - deutérium dans les eaux souterraines du bassin Zat.....	92
<b>Figure 58</b> : Corrélation entre l'oxygène-18 et $\text{Cl}^-$ des eaux souterraines du bassin Zat.....	92
<b>Figure 59</b> : Corrélation Deutérium et Altitude des eaux souterraines du bassin Zat.....	94
<b>Figure 60</b> : Corrélation entre $^{18}\text{O}$ et altitude des points d'eau souterraine du bassin Zat.....	94
<b>Figure 61</b> : Relation oxygène-18 et altitude.....	95

# **Introduction générale**

Venue du ciel, recueillie par les rivières, les fleuves, les lacs, pénétrant dans le sol, l'eau était consommée par les hommes, les animaux et les plantes, le surplus retournant à la mer, d'où elle s'évaporait pour constituer les nuages qui, en donnant naissance à la pluie, recommençaient inlassablement le même cycle.

Durant quatre milliards d'années, grâce à ce cycle éternel, la quantité d'eau présente sur terre ne s'est pas modifiée d'un litre. Certes, il y avait cependant des failles, l'eau ne tombe pas toujours où il le faut et dans la quantité souhaitable, parfois elle tombe trop, d'où des inondations, parfois elle fait défaut, d'où des sécheresses.

Le bassin de Tensift est situé dans un contexte climatique aride à semi aride avec une morphologie complexe. Contenant le haut Atlas, la plaine du Haouz et le massif des Jbilet. La quantité de l'eau disponible est faible et variable dans l'espace et dans le temps. En plus de la rareté de l'eau et de son inégale répartition, due à l'effet des changements climatiques observée à l'échelle planétaire, la région est soumise à une demande croissante en eau. Pour accompagner cette situation préoccupante, une gestion durable des ressources en eaux s'impose et exige la mise au point d'un plan d'exploitation au niveau de la zone d'étude. Dans ce sens les études hydrologiques et hydrogéologiques se sont multipliées afin de mieux cerner ce problème.

La présente étude s'inscrit dans le cadre du stage de fin d'études organisé par la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech (FSTM) pour l'obtention du diplôme de Master des Sciences et Techniques en Eau et Environnement (MST EE). Son objectif est de mettre en pratique les outils hydrochimiques et isotopiques pour appréhender le fonctionnement hydrogéologiques des bassins versant Ourika, Rhéraya et Zat.

Le stage s'est déroulé du 20/02/12 jusqu'au 22/06/12 au sein du à l'unité Eau et Climat au Centre Nationale de l'Energie des Sciences et Techniques Nucléaire (CNESTEN). Il est effectué dans le cadre d'une convention établie entre la FSTM, le CNESTEN et le Laboratoire Mixte International (LMI).

Compte tenu des objectifs de notre travail, on a choisi de présenter cet ouvrage en 4 chapitres. :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, la caractérisation géographique, géologique, hydrogéologique et climatologique.
- Le deuxième chapitre présente des généralités sur l'hydrogéochimie et l'isotopie des eaux, tente de mettre en évidence les principes de ces deux vols scientifiques et l'apport des techniques utilisées pour l'interprétation des phénomènes naturels.
- Le troisième chapitre présente les différentes techniques d'analyses physico-chimiques et isotopiques utilisées.
- Le quatrième chapitre est dédié à la présentation des résultats et discussions. L'interprétation des résultats des analyses chimiques et isotopiques concerne les isotopes stables et radioactifs de la molécule d'eau, respectivement, l'oxygène 18, Deutérium et le Tritium.

## **Présentation de l'établissement d'accueil (CNESTEN)**

Le Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTEN) est un établissement public à caractère scientifique, technique, industriel et commercial, doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière, placé sous la tutelle du Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Formation des Cadres et de la Recherche Scientifique et administré par un conseil d'administration présidé par le Premier Ministre. Les Missions du CNESTEN sont arrêtées par sa loi de création, loi no 17-83 promulguée par Dahir No 1-85-98 du 14 novembre 1986 dont l'objectif principal est de développer la recherche et de promouvoir les applications des techniques nucléaires dans les différents secteurs socio-économiques du pays: médecine, industrie, environnement, agriculture, hydrologie, etc.



C'est un complexe technologique abritant un réacteur de recherche et un ensemble de modules scientifiques et techniques. Il est situé à 22 Km au Nord-Est de Rabat et à 15 km au Sud-Ouest dans la forêt de la Mâamora.

Ce site a été choisi parmi une quinzaine de sites potentiels, sur la base des critères suivants :

- ⊕ Proximité du tissu scientifique, industriel de la région (Axe Casablanca, Rabat, Kénitra) et des Centres de décisions administratives ;
- ⊕ Eloignement des zones d'agglomérations importantes sur le plan démographie, tout en étant à proximité de la voie express que représente l'autoroute Casa-Rabat-Tanger ;
- ⊕ Critères géologiques, hydrologiques, géotechniques, sismiques, etc.

## **Secteurs d'activité**

### **✚ Médecine et biologie**

C'est en médecine que les isotopes radioactifs ont trouvé leurs premières applications. Limitées initialement à l'exploitation des effets thérapeutiques des radiations, ces utilisations se sont étendues par la suite et, notamment grâce à la fabrication de très nombreux radioéléments artificiels, du domaine des soins à celui du diagnostic. En Biologie le marquage isotopique et l'utilisation des rayonnements sont utilisés pour comprendre les fonctions des molécules, déterminer et analyser les structures moléculaires.

### **✚ Radio pharmacie**

Approvisionnement des services de médecine nucléaire en radio-pharmaceutiques, développement et mise au point de nouveaux protocoles de fabrication des produits radio-pharmaceutiques et optimisation de leur utilisation en médecine nucléaire.

### **✚ Biologie moléculaire**

Mise au point de produits et kits utilisant des techniques moléculaires pour le diagnostic et le suivi des maladies infectieuses ;

Formation sur les techniques de biologie moléculaire et sur l'utilisation des sondes radiomarquées pour l'hybridation moléculaire.

### **✚ Physique médicale**

Optimisation et amélioration de la qualité des prestations en imagerie médicale, vérification des performances des installations selon les protocoles internationaux.

### **✚ Environnement & ressources naturelles**

La mise au point d'outils d'analyse tels que les méthodes faisant appel aux traceurs, l'analyse par activation neutronique, l'analyse par fluorescence X et la spectrométrie d'absorption atomique a élargi la gamme des techniques disponibles pour l'étude et la détection de polluants de l'environnement comme les pesticides et les métaux toxiques. Ces outils sont désormais couramment utilisés pour l'évaluation des ressources en eau et des ressources minérales. Les techniques nucléaires apportent une contribution importante à la préservation et à la gestion rationnelle de l'environnement et des ressources naturelles. Les analyses qui sont effectuées dans ce secteur sont citées comme suit :

#### **☞ Les analyses élémentaires :**

Caractérisation géochimiques des roches géologiques, dosage des terres rares, des polluants dans les eaux, dans les sédiments, les sols et les échantillons biologiques, dosage des métaux lourds et de la plupart des éléments chimiques.

#### **☞ Analyses radiométriques**

-Analyses des radioéléments naturels (séries U et Th, K-40, Be-7, H-3, C-14...) et/ou artificiels (Cs-137, Pu-239+240, Am-241, Sr-90...) dans différents types d'échantillons (géologiques, environnementaux, miniers, agro-alimentaires, etc.

-Datation par les méthodes nucléaires (U/Th, C-14, traces de fissions) et application en géologie et archéologie, etc.

#### ☞ **Analyses isotopiques**

Recherche appliquée dans les domaines de l'hydrologie, de la géochimie, de la paléoclimatologie et de l'agriculture, basée sur des analyses isotopiques des éléments O-18, H-2, C-13, C-14 et Tritium, chimie de l'eau : analyse des éléments majeurs et des éléments trace et sur des analyses isotopiques des éléments C-13 et N-15 contenus dans la matière organique.

#### ■ **Applications**

Détermination de l'origine de l'eau ;

Détermination du taux de recharge et de l'âge des eaux ;

Interaction des eaux superficielles et des eaux souterraines ;

Détermination de l'origine de la minéralisation et de la pollution des eaux ;

Etude des climats passés ;

Etude des relations sol-plante.

#### ✚ **Energie et technologie des réacteurs/ réacteur triga markII**

Le nucléaire est devenu bien plus qu'une technique, c'est une industrie à part entière avec plus de 433 réacteurs de puissance dans le monde.

Les scientifiques utilisent les réacteurs de recherche pour étudier les propriétés atomiques de la matière. Lorsque des substances non radioactives sont bombardées par des neutrons à l'intérieur d'un réacteur, elles deviennent radioactives, ce qui permet de produire une grande variété de radioisotopes pour diverses applications en médecine, en agronomie, hydrologie, mines, industrie, etc. Et de faire des analyses avec un haut degré de précision.

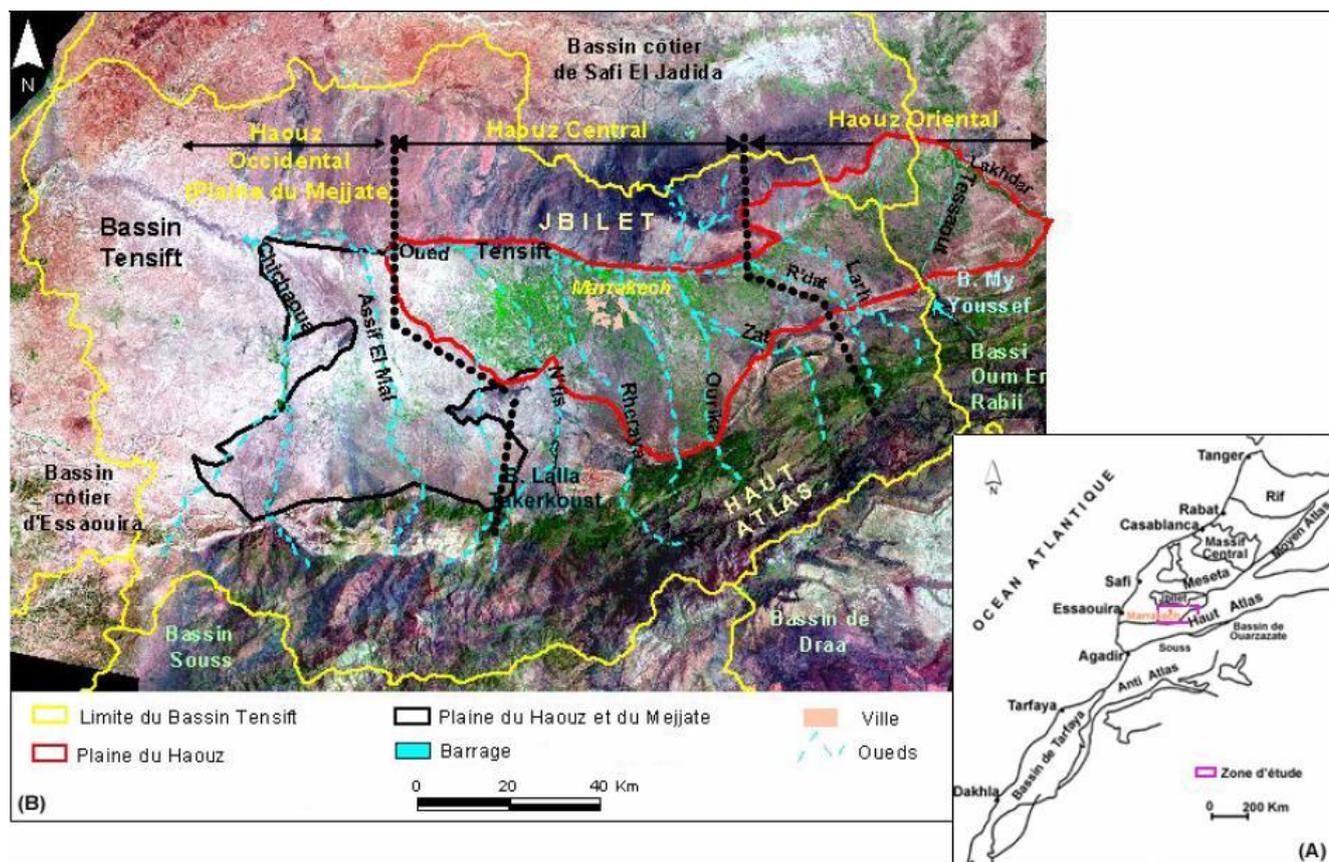
# **Chapitre I : Présentation** **de la zone d'étude**

# I. Présentation du cadre général

## I.1. Bassin versant de Tensift

### I.1.1. Situation géographique

Depuis sa source à Ras El Ain jusqu'à son embouchure à Souira Gdima, l'oued Tensift draine un bassin versant d'une superficie de 18 500 km<sup>2</sup>. Ce large domaine continental est situé entre les latitudes 32° 10' et 30° 50' Nord et les longitudes 9° 25' et 7° 25' Ouest.



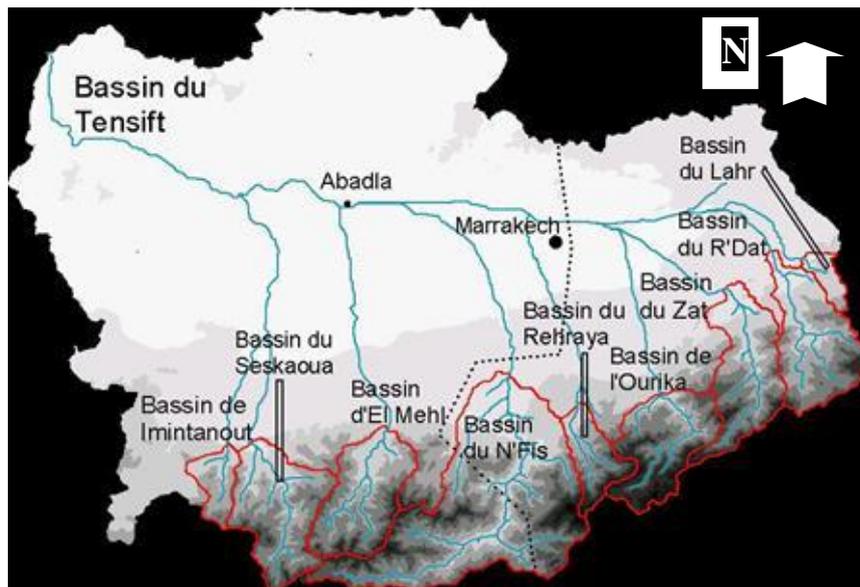
**Figure 1 :** Situation du bassin du Tensift, au sud du Maroc.

C'est un bassin à relief très contrasté, les altitudes varient entre 0 et 4167m (sommet du Jbel Toubkal). Il est drainé par l'oued Tensift qui côtoie au Nord-Est la province d'El Kelâat Sraghna, à l'Est celle d'Azilal, au Sud-Est celle d'Ouarzazate, au Sud-Ouest la province d'Essaouira et au Nord-Ouest celle de Safi. Il se déverse dans l'océan atlantique (Figure1).

L'oued Tensift traverse le bassin d'est en ouest. Il est alimenté de façon quasi exclusive par ses affluents rive gauche qui drainent les flancs nord de l'Atlas. Ces affluents, installés sur un relief montagneux à structure et nature géologique hétérogène, ont des caractères torrentiels. Les principaux affluents sont localisés dans la plaine de Haouz : Oued Ghdad, Oued Zat, Oued Ghmat, Oued N'fis, Oued Rhéraya, Assif El Mal, Oued Chichaoua, Oued Tiroula et Oued Talmost. A la rive droite, aucun cours d'eau pérenne n'existe, seuls des cours

d'eau résultant d'événements pluvieux violents contribuent épisodiquement à l'alimentation de l'oued. Il en résulte un bassin versant très dissymétrique dont la rive droite ne joue qu'un rôle hydrologique secondaire.

Les affluents de la partie sud du bassin, désigne neuf sous -bassins montagneux orientés sud nord (Figure 2), représente le véritable château d'eau de la zone avec une hydrologie de surface très active. Entre les Jbilet et l'Atlas, la plaine ne constitue pour l'hydrologie de surface qu'une zone de transit et de consommation de l'eau, l'hydrologie active ayant lieu en profondeur dans les nappes souterraines.



**Figure 2 :** Présentation des neuf sous-bassins atlasiques du bassin du Tensift. La ligne de partage climatique est en pointillés (Chaponniere, 2005).

**Tableau 1 :** Superficie des différents sous-bassins versants atlasiques du Tensift

Bassin versant	Superficie (km <sup>2</sup> )
Lahr	77
R'Dat	521
Zat	545
Ourika	505
Rehraya	227
N'Fis	1700
El Mehl	523
Sesksaoua	577
Imintanoute	149

L'Agence de Bassin Hydraulique du Tensift qui s'occupe de la gestion de l'eau dans le bassin du Tensift. Et afin de connaître les apports amont, un réseau de plusieurs stations hydrométriques a été mis en place dans l'Atlas depuis 1961 mesurant quotidiennement la

pluie et trois fois par jour la hauteur d'eau dans l'oued. L'historique des données disponibles est variable d'une station à l'autre.

**Tableau 2 :** *Différents variables physiographique du bassin versant du Tensift (Riad, 2003)*

BASSIN VERSANT	STATION HYDROMETRIQUE	N°IRE (Code)	A (km <sup>2</sup> )	P (km)	K <sub>G</sub>	RECTANGLE EQUIVALENT		S	LON (km)	D <sub>d</sub>	Altitude Z (m)
						L (km)	l (km)				
Tensift	Aghbalou	2089/53	503	114	1.42	46.32	11.05	5.76	56.0	2.05	1070
	Taferiat	1562/53	515	117	1.44	47.53	10.80	5.92	34.0	1.04	760
	Tahanaout	1565/53	226	100	1.86	44.92	5.03	14.04	38.0	1.01	925
	Iguir NKouris	510/62	848	190	1.82	84.70	10.01	2.47	80.0	1.06	1100
	Imin El Hamam	1566/53	1296	210	1.63	90.46	14.32	2.10	110.0	1.08	470
	Sidi Rahal	44/54	452	130	1.71	57.11	7.91	5.55	45.0	1.03	690

A : Superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>.

P : Périmètre stylisé en km du bassin versant

KG : Indice de compacité de Gravelius

L : Longueur du rectangle équivalent en km

l : Largeur du rectangle équivalent en km.

S : Pente moyenne du bassin versant en %

Dd : La densité de drainage

Z : Altitude de la station hydrométrique.

LOG : La longueur du cours d'eau principal

### ***1.1.2. Cadre climatologique***

Le bassin versant de l'oued Tensift est caractérisé par un régime climatique connu par sa grande aridité dont l'intensité est conditionnée essentiellement par l'altitude et en une moindre mesure par la continentalité.

Par ailleurs, le contraste saisonnier est très bien marqué, des pluies qui sont souvent concentrées durant la période automnale et hivernale, sont irrégulières, intenses et violentes. Le reste de l'année, la sécheresse prend une ampleur considérable surtout dans les zones de plaine où les températures et l'évaporation sont élevées.

#### **1.1.2.1. Précipitations**

Le bassin du Tensift présente deux variantes du régime pluviométrique océanique situées de part et d'autre d'une ligne de partage orientée globalement Nord Sud (ligne en pointillés Figure 2). Le mois le plus pluvieux des stations situées à l'ouest de cette ligne est le

mois de novembre. Une deuxième saison de précipitations, moins marquée, a lieu en mars ou avril. Pour les stations situées à l'est de la ligne de partage, l'importance relative des deux saisons de pluies est inversée. La première saison des pluies (novembre / décembre) est peu marquée alors que la deuxième (entre février et avril) présente les pluviométries les plus élevées de l'année. Pour l'ensemble des stations situées de part et d'autre de cette ligne de partage, le mois de janvier est relativement sec et le mois de juillet est le plus sec (Chaponniere, 2005)

De ce fait le bassin du Tensift se caractérise par une faible pluviométrie moyenne allant de 250 à 350 mm/an avec des variations interannuelles et intersaisonniers importantes. Ces caractéristiques climatiques limitent les possibilités d'amélioration et de diversification de la production agricole et démontrent l'importance d'une gestion rationnelle des eaux de la région. Celle-ci suppose une connaissance fine des ressources en eaux disponibles sur le bassin.

#### **I.1.2.2. Température**

Les températures moyennes mensuelles varient entre 17°C et 20°C. Les mois les plus chauds sont généralement Juillet et Août avec 25°C à 29°C sur l'Atlas et la plaine de Haouz et 19°C à 24°C dans les zones côtières. Le mois le plus froid est Janvier avec 12°C sur l'Atlas et la plaine du Haouz et 13 à 14,5°C dans les zones côtières (ABHT, 2002).

#### **I.1.3. Végétation**

La prédominance des sols nus est bien visible sur l'ensemble du bassin. Dans les Jbilet et sur les flancs de l'Atlas les sols superficiels où les roches affleurantes dominent. En l'absence du couvert végétal, les épisodes pluvieux violents sont responsables du ravinement important. Sur le piémont de l'Atlas et les pentes douces au sud des Jbilet une végétation éparse apparaît au printemps et disparaît rapidement sous l'effet de l'aridité.

La forêt est peu répandue, présente principalement sur les piémonts. Elle est constituée de résineux, de quelques feuillus et de genévriers thurifères en altitude. Au fond des vallées encaissées de l'Atlas les terres sont cultivées.

#### **I.1.4. Cadre géologique**

Vu la diversité des reliefs dans le bassin versant de Tensift, ce dernier montre une lithologie très variable :

- **Le Haut Atlas**

Les affleurements lithologiques sont dominés par les faciès suivants (Riad, 2003) :

- Des roches éruptives et métamorphiques précambriennes notamment les granites, diorites, dolérites, andésites et rhyolites,
- des schistes primaires,
- des formations secondaires fortement colorées en rouge et largement dominées par des calcaires, des grès, des marnes et des argiles.

#### - Les Jbilets et Mouissates

Les schistes sont largement répandus dans les Jbilets avec des faciès et de couleurs très variés. On y distingue des schistes sombres souvent lités, des schistes argileux et des schistes gréseux avec des bancs épais de grès ou de quartzites. Par ailleurs, d'autres formations moins étendues peuvent être distinguées notamment des conglomérats, des affleurements calcaires et siliceux, des roches éruptives comme les granites et les gabbros du Précambrien (Riad, 2003).

#### - Le plateau de Mouissates

Il est dominé dans une large mesure par des roches carbonatées du Jurassique.

#### - Le bassin d'Essaouira-Chichaoua

Seul le secteur nord de cet ensemble géomorphologique fait partie du bassin versant du Tensift. Il s'agit d'un large plateau légèrement relevé au Sud et au Nord. Les affleurements rocheux sont dominés par des calcaires jurassiques et crétacés, des couches phosphatées marneuses et marno-calcaires du Tertiaire et enfin un Quaternaire localement enclavé dans les cuvettes synclinales ou bordant le lit actuel de l'oued Tensift sous forme de terrasses caillouteuses ou sablo-limoneuses (Riad, 2003).

#### - La plaine de Haouz

Elle est caractérisée par une topographie plane et monotone s'étendant sur une largeur de 150 km d'Est en Ouest. Le socle primaire schisteux est recouvert par des formations secondaires et tertiaires variées, notamment des grès rouges du Permo-Trias ainsi que des calcaires, marnes et grès du Crétacé et de l'Eocène. Le remplissage quaternaire est assuré par des épandages alluviaux caillouteux, limoneux ou sableux, dont les plus anciens sont surmontés d'une carapace calcaire.

Le bassin versant de Tensift caractérisé par des pentes fortes, les affleurements géologiques essentiellement constitués par des formations imperméables (Tableau 3), favorise l'écoulement superficiel qui se traduit par des hydrogrammes pointus, observés à l'exutoire du bassin. Ceci confère aux écoulements un caractère torrentiel, et offre un environnement propice aux pulsations brutales des cours d'eau et par conséquent les risques d'inondation (c'est le cas de la crue d'Ourika).

Le tableau suivant donne la répartition des différentes formations lithologiques en pourcentage du bassin versant du Tensift :

**Tableau 3** : Répartition géographique en % des différentes formations lithologiques du bassin versant du Tensift (Chaponniere, 2005).

	Granites et roches volcaniques	Schistes et gneiss	Marnes et argiles	Calcaires	Grès	Alluvions
	GRV (%)	SGN (%)	MAR (%)	CAL (%)	GRS (%)	ALL (%)
	Terrains imperméables			Terrains perméables à semi-perméables		
Tensift	15	30	10	6	9	30

### 1.1.5. Cadre hydrogéologique

Le massif ancien du Haut atlas étant essentiellement constitué de roches peu perméables, l'hydrogéologie n'offre de l'intérêt que dans la mesure où l'enneigement prolongé permet de maintenir toute l'année une réserve d'eau en général très limitée, dans des réservoirs souvent peu étendus et de porosité médiocre (des arènes, zones d'altération superficielle en général, et formations fissurées).

Les formations anciennes, métamorphiques ou éruptives :

Formées de schistes, de gneiss et de quartzites ou de granites, d'andésites et de rhyolites qui affleurent largement dans le massif ancien du Haut Atlas. Ce sont des roches imperméables mais lorsqu'elles sont altérées, fissurées ou fracturées, elles peuvent emmagasiner de l'eau de pluie en quantité variant avec l'importance de ces phénomènes.

Des sources de faible débit peuvent apparaître dans ces terrains à la faveur d'un changement de perméabilité, elles subviennent à l'alimentation en eau de douars notamment la source d'assif Ait-Irène avec un débit de 4 l/s dans le massif de l'Oukaimeden appartenant au bassin versant de l'Ourika (bassin inclus dans la zone d'étude) (Ressource en eau du Maroc, 1977).

Les formations continentales et lagunaires :

Appartiennent généralement au Permo-trias et également il en existe en petite quantité au Lias, dans le Jurassique moyen et supérieur et au Crétacé. Elles affleurent principalement dans les bassins versant des oueds Issen, Tassaout, R'Dat et Zat (qui est un bassin inclus dans cet étude). Ce sont des couches grossièrement détritiques, tantôt argilo-marneuses, tantôt gréseuses et renferment du gypse et du sel gemme. Les niveaux gréseux sont plus au moins fissurés, avec une faible perméabilité. Des sources de faible débit peuvent en sortir aux points bas, alimentant les douars.

Les formations calcaires :

Il peut s'agir des calcaires proprement dits, de calcaires dolomitiques ou de marno-calcaires. Ces formations peuvent appartenir dans la région Géorgien, au Lias, au Crétacé ou à l'Eocène terminal. Le Géorgien calcaire par exemple n'affleure que dans la partie occidentale du massif ancien du Haut Atlas en particulier dans le bassin de l'oued N'Fis. Les sources qui en sortent à la faveur de fissures ou de failles aux contacts des terrains schisteux et souvent au niveau des alluvions des oueds ont des débits faibles.

Le Lias calcaire joue un rôle aquifère dans la partie orientale du massif ancien du Haut Atlas. Les calcaires du Crétacé et du l'Eocène alternent avec les marnes, sont localisés dans les zones externes du massif : bassins de Mejjat et Haouz au Nord.

Les formations alluviales récentes :

Ce sont des dépôts du Quaternaire constitués par des conglomérats, des graviers et galets de forte perméabilité, des éléments fluvio-lacustres calcaires et gréseux, parfois marneux, peu perméable, enfin des limons qui constituent généralement les sols. Ces dépôts tapissent le fond des vallées dans toute la chaîne.

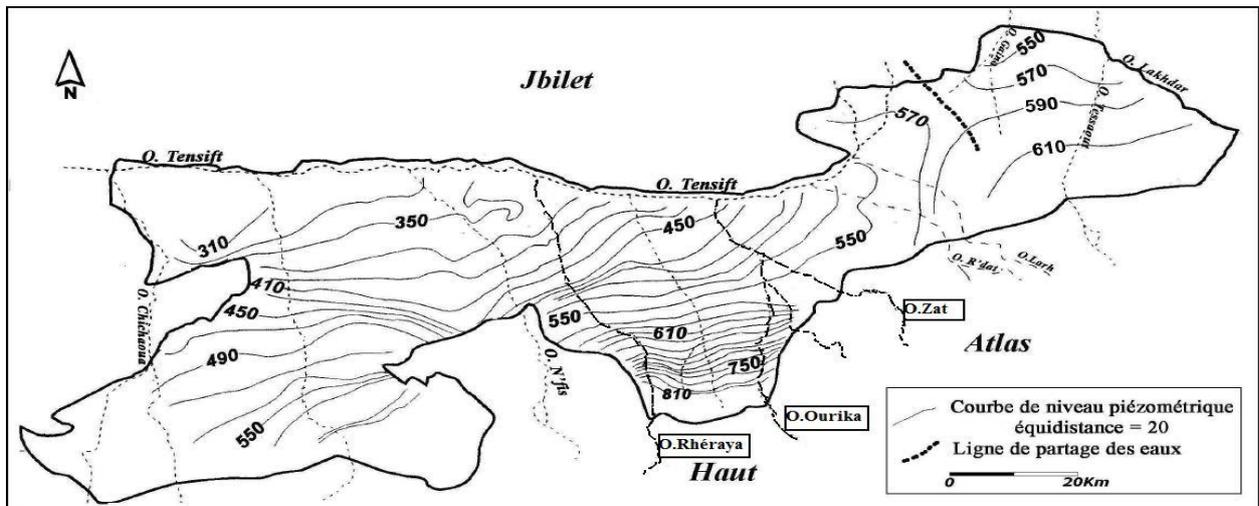
Les nappes phréatiques se relient, formant ainsi un système continue d'écoulement dans le Quaternaire, chacun de ces systèmes se jette hors de la chaîne dans ce bassin dont ils affluent (plaine de l'Haouz et de Mejjat au Nord) (Ressource en eau du Maroc, 1977).

Les principales nappes phréatiques dont se débouchent les écoulements de tout le bassin sont les suivantes :

- La nappe de Mejjat : Les principales unités hydrogéologiques de la plaine de Mejjat sont constituées des formations Plio-quaternaires et Eo-crétacées
- La nappe de la Bahira : la Bahira s'étend sur une superficie de 5000 Km<sup>2</sup>. La couverture sédimentaire qui forme la plaine renferme deux unités aquifères.
- La nappe du Haouz : considérée comme la plus productive dans la région, est limitée au Sud par la chaîne atlasique et les chaînons des Jbilet au Nord. Elle s'étend sur une superficie d'environ 6000 Km<sup>2</sup> et se trouve allongée en direction Est-Ouest (Figure 3), sa longueur moyenne est de 40 Km.

La nappe du Haouz est une nappe importante et généralisée au niveau de toute la plaine, abritée par des formations mio-plioquaternaires issues du démantèlement de la chaîne atlasique. L'alimentation de la nappe du Haouz est réalisée essentiellement au débouché des oueds atlasique, entre l'Imintanout et Lakhdar (Figure1), après ruissellement sur les bassins

versants de la région. L'analyse de la carte piézométrique permet de déterminer le sens de l'écoulement qui s'effectue généralement du Sud vers le Nord (Figure 3).



**Figure 3:** Carte piézométrique de la nappe de Haouz (DRPE, 1988)

Cette étude se consacre à l'identification des circulations des eaux par les méthodes chimiques et isotopiques des sous-bassins : Rhéraya, Ourika et Zat. Ces sous-bassins sont de superficies moyennes par rapport à celle des autres sous-bassins atlasiques. Par ailleurs leurs caractéristiques géologiques, topographiques et de végétation sont représentatives de l'Atlas.

## II. Présentation de la zone d'étude

### II.1. Présentation du bassin de Rhéraya

#### II.1.1. Situation géographique

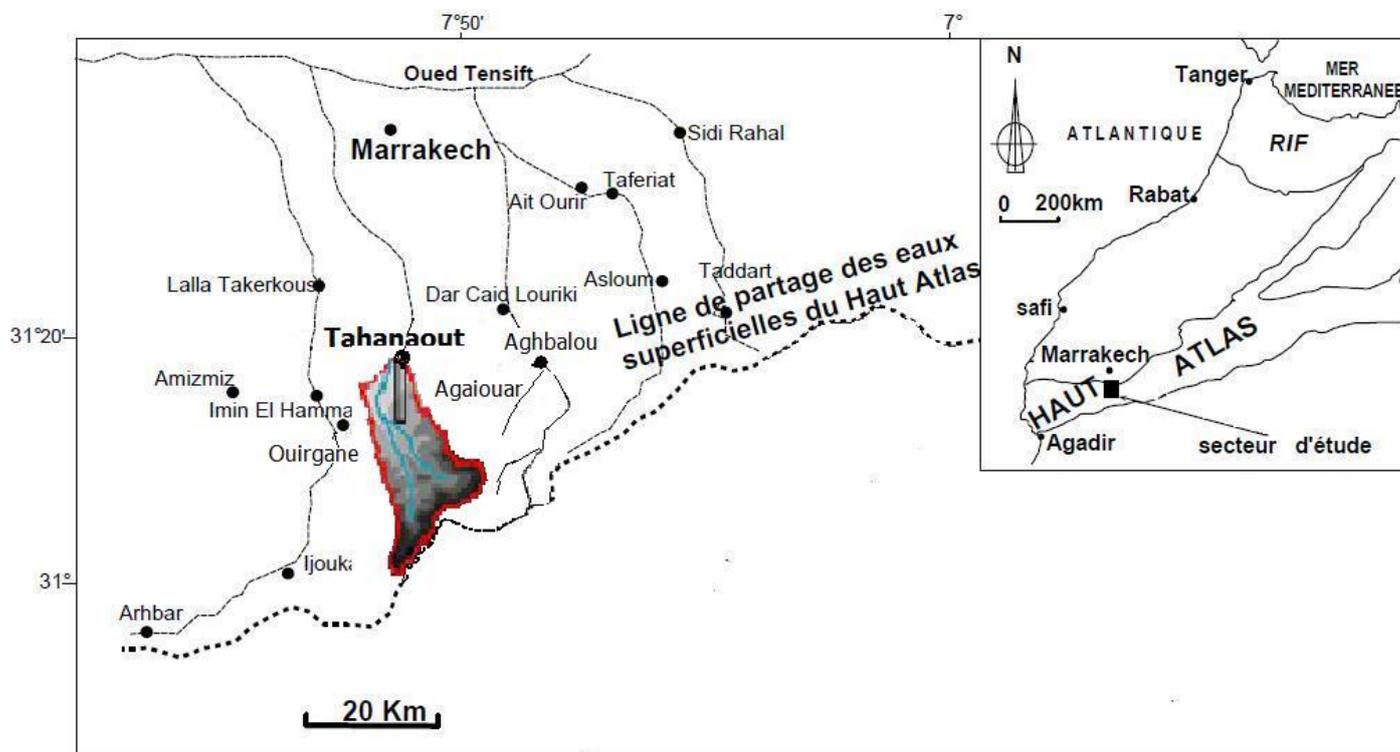


Figure 4 : situation géographique du bassin de Rhéraya

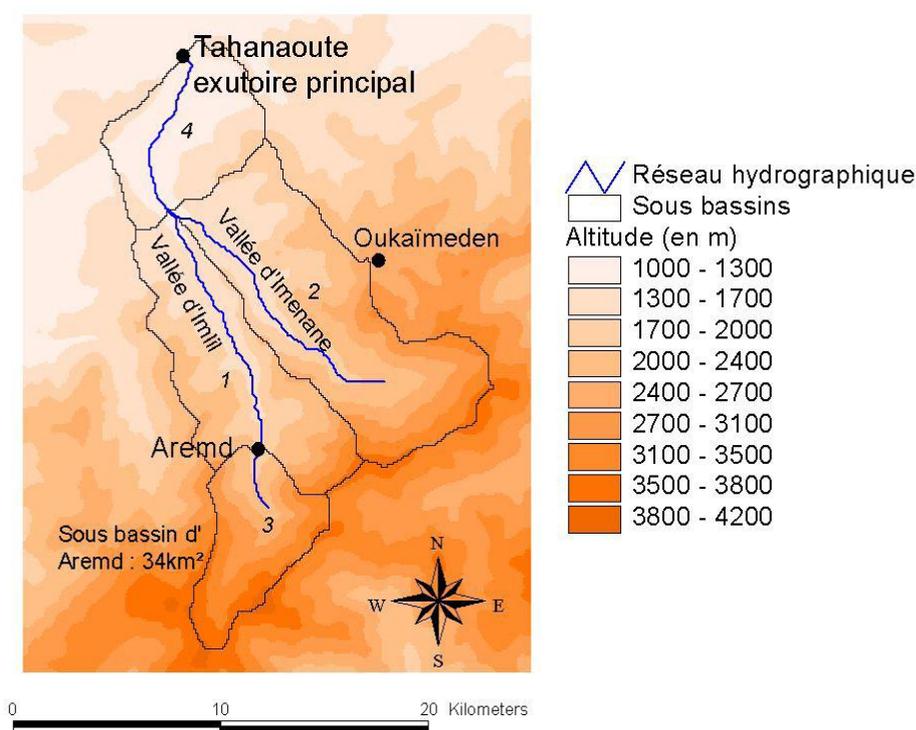
Le bassin versant de la Rhéraya est situé dans le Haut Atlas de Marrakech, entre la latitude  $30^{\circ}10'$  et  $30^{\circ}20'$ , et la longitude  $7^{\circ}40'$  et  $8^{\circ}$  Ouest. Il est localisé à une quarantaine de kilomètres au sud de Marrakech, dans le massif de Toubkal. Couvre une superficie de 227 km<sup>2</sup>. Il comprend une grande partie des plus hauts sommets de l'Afrique du Nord, en particulier le plus élevé d'entre eux, le Jbel Toubkal (4165 m) avec une altitude moyenne de 2168 m. Son exutoire principal situé à quelques Kilomètres au Sud de la ville de Tahanaout.

Ce bassin versant est limité au Nord par la plaine de Haouz, au Sud par le bassin d'Assif Tifnout (Haut Souss), à l'Est par le bassin de l'Ourika et à l'Ouest par celui du N'fis (Figure 4) (Ouagga, 2005).

Ce bassin est celui dont l'enneigement relatif est le plus important dans la région du Tensift (Cruette, 1975; Haloui, 1986). Caractérisé par des pentes fortes ce qui fait le temps de concentration est court, illustre la géomorphologie de la zone.

Quatre sous-bassins se situent au sein du Rhéraya : un premier en amont dont l'exutoire est le village d'Aremd, un sous-bassin englobant la vallée d'Iménane et un autre la vallée

d'Imlil, enfin un sous-bassin aval couvrant la zone entre l'exutoire principal du bassin, Tahanaoute, et la jonction des deux vallées d'Imlil et d'Iménane (Figure 5).



**Figure 5 :** Réseau hydrographique du bassin Rhéraya avec ses quatre sous-bassins (chaponniere 2005)

### II.1.2. Cadre climatique et hydrologique

Les mesures hydrologiques et pluviométriques de l'oued Rhéraya sont suivies par la station hydrométrique installée depuis l'année 1962 par l'administration de l'hydraulique à l'exutoire de l'oued (Tahanaoute).

L'oued Rhéraya écoule un total annuel de 58 millions de m<sup>3</sup>. Le Rhéraya est à la fois pentu et arrosé, il est caractérisé par un régime nival prononcé. Les données recueillies au niveau de la station de l'hydraulique sont les suivantes :

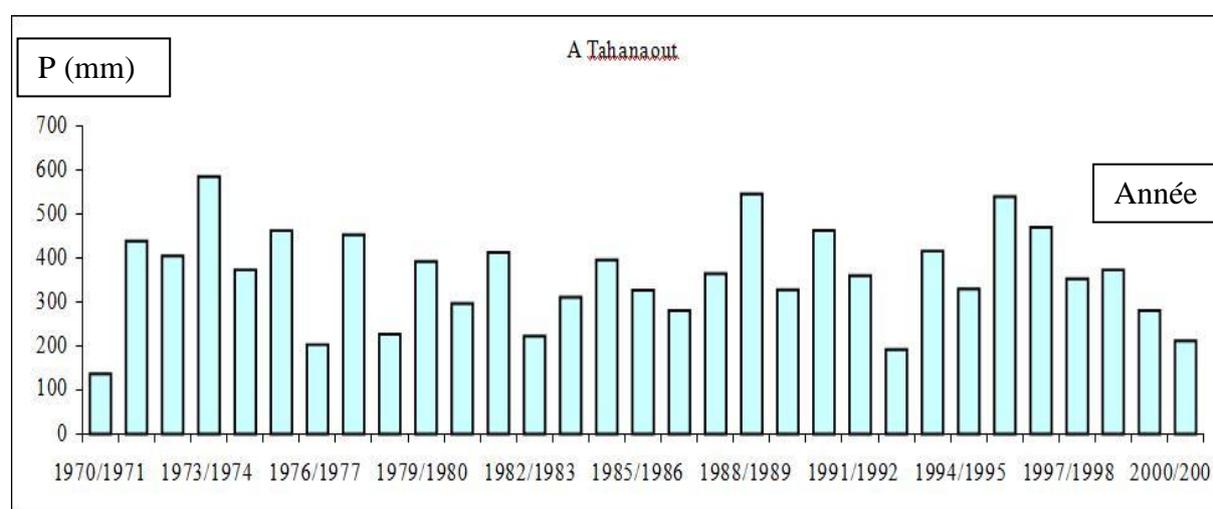
- Débit annuel moyen : 1.6 m<sup>3</sup>/s ;
- Débit spécifique : 7.1 l/s/Km<sup>2</sup> ;

La crue du 17/08/1995 a enregistré un débit de pointe de 300m<sup>3</sup>/s et celui du 28 /10/1999 a atteint 480 m<sup>3</sup>/s (Administration de l'hydraulique, 1988). La dégradation spécifique au niveau du bassin versant a été estimée sur la base de nombreuses mesures de concentration, la moyenne établie est de 1400T/Km<sup>2</sup>/an (MAMVA, 1991).

### II.1.2.1. Précipitations

Au niveau du bassin versant de Rhéraya il y a une rareté de mesure des paramètres climatologiques concernant les précipitations et les températures par manque des stations de mesure. Pour les précipitations, seules les stations de Tahannaout, Asni, Ouirgane et Armed sont fonctionnels.

Globalement le climat du Rhéraya est semi-aride. La pluviométrie moyenne annuelle (1971-2001) à l'exutoire du bassin est de 363 mm avec un écart type de 103mm (figure 6) (Rmich et al., 2004). Entre juin et septembre les précipitations sous forme d'orage violents, pendant l'hiver les événements sont de plus longue durée et il neige en altitude chaque année. La hauteur moyenne annuelle évaporée (1833,7 mm sur le bac Colorado).



**Figure 6 :** Variation des précipitations annuelles a Tahannaout (1970 - 2001) (Haloui 1986).

La variation des altitudes dans ce bassin joue un rôle capital dans la répartition des précipitations. Notamment à la station d'Agaiouar situé à 1700m d'altitude reçoit les précipitations les plus élevées de 604 mm du fait de son exposition face au vent humide, alors qu'Asni à 1200m (abritée dans une cuvette) et Tahanout à 925m ne reçoivent que 404.7mm et 398.2 mm. Les reliefs s'opposent plus ou moins fortement à la pénétration des masses humides à l'intérieur des bassins et des vallées, ce qui se traduit par une baisse souvent importante des précipitations.

Ainsi la station d'Armed abritée au dessus d'Imlil ne reçoit que 530 mm, alors que les sommets environnants reçoivent jusqu'à 900 mm (Haloui 1986).

La variation saisonnière des pluies est marquée par des maximums en fin d'hiver début de printemps, les minimums en été. Les mois de Juillet et Août reçoivent les plus faibles quantités de pluies avec des valeurs inférieures à 8 mm, alors que les mois Mars et Avril reçoivent les plus grandes quantités de pluie avec des valeurs moyennes de 100 mm. Les

stations de hautes altitudes (Agaiouar) sont les plus exposées aux précipitations (Haloui, 1986).

### **II.1.2.2. La température**

Concernant la température, à l'échelle mensuelle Le mois de Janvier est considéré le plus froid par contre les mois de Juillet et Aout sont les mois les plus chauds, la station de la plaine (Marrakech) étant la plus chaude (M= 38.3°C), et les stations des montagnes sont moins chaudes : Asni M= 30°C, Agaiuar M= 29.5°C (Haloui, 1986). Il y a donc un gradient décroissant de M en fonction de l'altitude, mais dans l'ensemble, ces températures restent élevées.

### **II.1.3. Végétation**

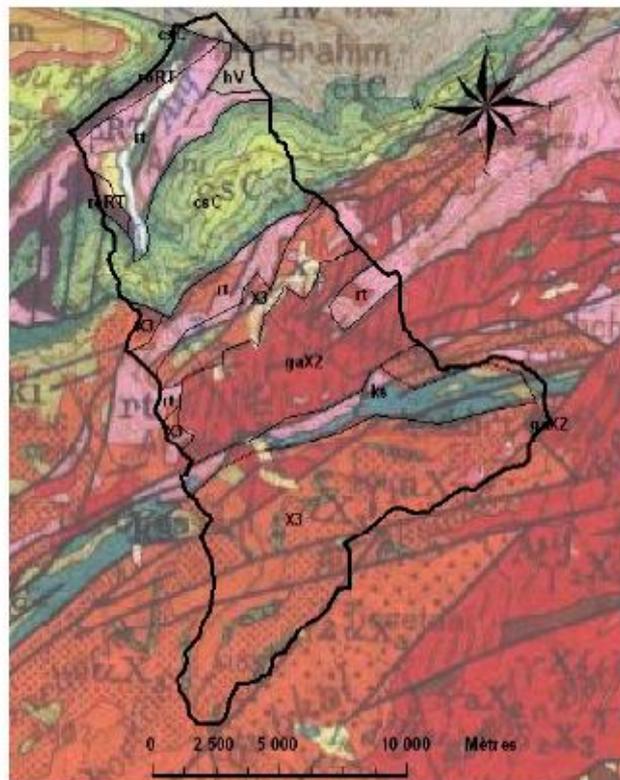
La végétation naturelle est constituée schématiquement de la forêt naturelle de thuya en basse altitude, et laisse place à des chamaephytes épineux en altitude (la forêt originelle de genévrier thurifère est très dégradée). La distribution spatiale de ces formations végétales est due d'une part à l'effet de l'exposition et d'autre part à la nature des sols. L'état clairsemé de ces formations laisse deviner l'impact des actions anthropiques (coupes de bois vif, pâturage, carbonisation et labour).

On retrouve les cultures irriguées le long des deux bras de Rhéraya alors que les cultures à sec sont souvent observées de part et d'autres de l'oued dans les basses altitudes.

### II.1.4. Cadre géologique

Le bassin du Rhéraya est situé dans le Haut Atlas central siliceux. La Figure 7 représente la carte géologique du bassin. Trois zones géologiques se distinguent (Haloui, 1986) :

La zone sub-atlasique couvre le tiers nord du bassin où elle est composée d'un socle rigide précambrien et paléozoïque grés-schisteux et calcaires, socle apparent dans les gorges de Moulay Brahim tout à fait au nord du bassin. Sur ce socle, une importante couverture mésozoïque au faciès détritique rouge fait de conglomérats, grès et siltstones du Trias est encore présente. C'est la roche tendre dans laquelle est creusé le bassin d'Asni actuel. Au nord et au sud du bassin d'Asni, un faciès carbonaté et marneux plus dur constitue les plateaux de Kik et Tihallatine.



Symbole	Echelle stratigraphique	Lithologie
csC	Sénonien faciès continental	Formations II marno-calcaire
roRT	Trias	Basaltes doléritiques
rt	Permo-Trias continental	Grès et argiles
hV	Viséen	Formations I à dominante calcaire
ks	Acadien	Formations I à dominante schisteuse
gaX2	Préambrien III	Granites à biot. et granodiorites leuco.
X3	Préambrien III	Roches magmatiques

**Figure 7** : carte géologique du Rhéraya  
(Extraite de carte géologique de Marrakech au 1/500 000)

Cette zone sub-atlasique constitue le promontoire du versant nord du Haut Atlas, c'est la première barrière dominant la plaine du Haouz. C'est une formation présente au sein de la plupart des bassins versants atlasiques. Plus au sud, le horst de Rhéraya est composé de matériaux rocheux primaires et permo-triasiques. Il constitue un bloc élevé par rapport à la zone sub-atlasique et incliné vers l'ouest.

Les matériaux permo-triasiques peuvent être observés au niveau des deux branches du Y que forme ce bassin : les vallées d'Imlil et d'Iménane.

Ces vallées sont constituées de dépôts (des basaltes doléritiques) reposant sur une surface anté-permotriasique fossilisée (conglomérats et grès). Plus au sud dans ces vallées, les matériaux primaires pré-cambriens constitués surtout de granites et de laves (andésites) sont visibles. Enfin, le bloc le plus élevé est la zone axiale qui forme les hauts sommets du bassin.

C'est surtout dans cette zone que se trouvent les affleurements de précambrien caractérisé par des andésites, rhyolites et trachytes.

Remarquons également l'existence de failles qui, comme les formations calcaires, peuvent occasionner des pertes dans le bilan hydrologique.

Selon le rapport de la DRE (1988) les différentes formations géologiques du bassin peuvent être regroupées en trois classes :

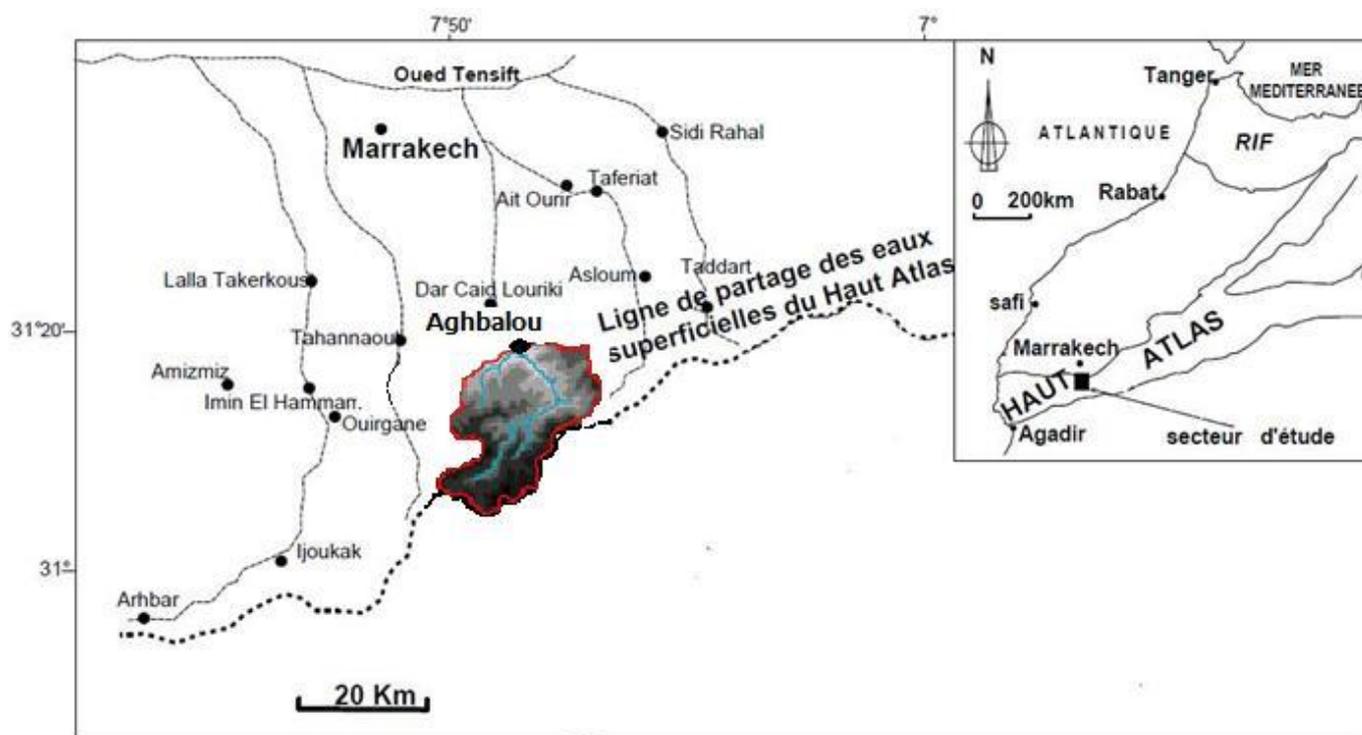
- Des formations imperméables (métamorphiques ou éruptives)
- Une formation calcaire relativement importante dans son bassin moyen.
- Des formations grésos-argileuses dans le bas du bassin.

## II.2. Présentation du bassin d'Ourika

### II.2.1. Situation géographique

La vallée de l'Ourika est l'un des plus célèbres sites touristiques du Maroc, située à 35 Km de Marrakech. Le bassin versant de l'oued se trouve entièrement dans le Haut Atlas de Marrakech entre les bassins versants de la Rhéraya et du Zat (figure 8).

Ce bassin se situe entre la latitude  $31^{\circ}$  et  $31^{\circ}20'$  N et la longitude  $7^{\circ}30'$  et  $7^{\circ}60'$  W, sur une superficie de  $503 \text{ km}^2$  ; les altitudes y varient de 1070 m à Aghbalou (à l'exutoire) à 4001 m au point culminant en amont du bassin. L'oued Ourika coule vers le Nord puis vers le Nord-Ouest. Son bassin versant est orienté vers ces directions (figure 8), il est par conséquent exposé aux perturbations pluvieuses en provenance de l'Océan Atlantique avec une direction Nord-Ouest. Cette exposition et l'orientation vers le Nord et le Nord-Ouest, permettent au bassin de l'Ourika d'être assez bien arrosé par les eaux pluviales.



**Figure 8 :** situation géographique du bassin d'Ourika

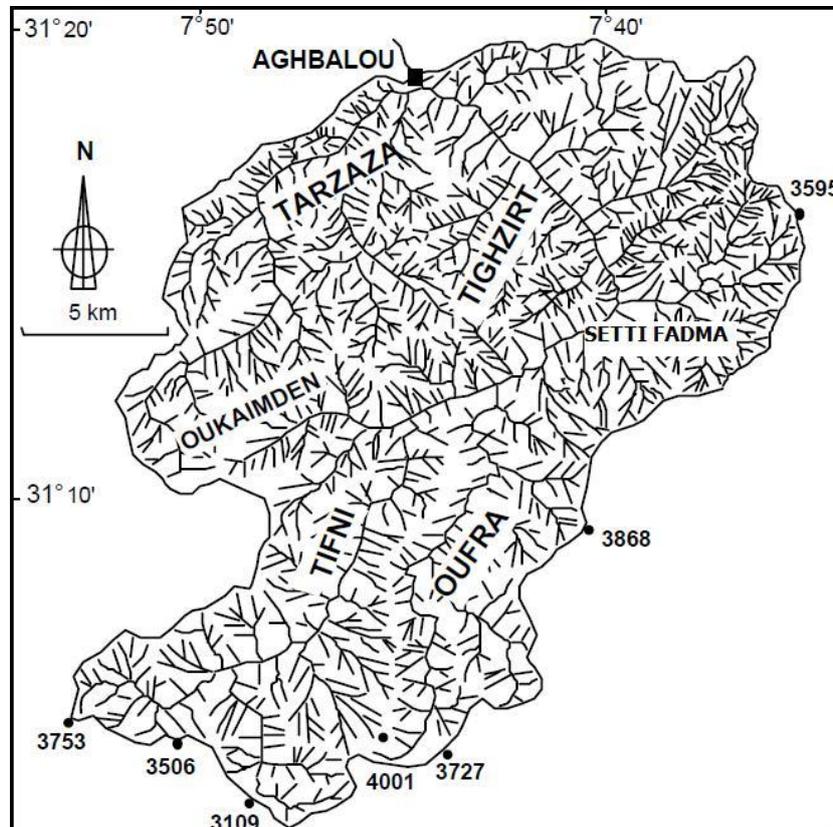
Outre l'exposition des versants aux flux perturbés, les effets d'ubac et d'adret jouent également un rôle important dans l'aridité des sols et leur capacité d'emmagasiner longtemps l'humidité et de diminuer le pouvoir évaporant qui pourrait être important à ces altitudes.

Selon l'orientation des versants du Haut-Atlas vers le Sud ou vers le Nord, il existe un contraste dans la durée de l'ensoleillement et dans l'intensité calorifique des radiations reçues

au sol par unité de surface. Ceci est d'autant plus accusé que les pentes des versants sont importantes, comme c'est le cas sur le bassin de l'Ourika, où les vallées sont profondes et les versants exposés pour la plupart vers le Nord ou le Nord-Ouest. Ces versants ne reçoivent pas les rayons solaires sous de forts angles d'incidence, et certaines vallées sont dans l'ombre très tôt le soir et assez tard le matin. Les plus profondes perdent même tout ensoleillement pendant quelques semaines en hiver. (Saidi, Agoussine, et Daoudi., 2006)

L'Oued Ourika est un affluent de oued Hadjer, lui-même affluent de Tensift sur sa rive gauche. La longueur de l'Ourika de ses sources à l'exutoire du bassin versant à Agbalou est de l'ordre de 45.5 Km (figure 8). Le réseau hydrographique du bassin de l'Ourika est assez dense et bien ramifié, et les principaux affluents du cours principal étant :

- Assif N'oufra: en rive droite qui prend naissance à une altitude de 3800 m.
- Assif N'Tifni: en rive droite appelé Aksoual à sa naissance à une altitude de 3800 m environ.
- Assif Tarzaza: en rive gauche dont la source est à 3600 m environ, oued très pentu ce qui explique ces crues violentes causant souvent des dégâts importants. (de l'ABHT)



**Figure 9** : Le réseau hydrographique du bassin versant de l'Ourika (Saidi, 2006)

## II.2.2. Cadre climatique et hydrologie

### II.2.2.1. Les précipitations

L'analyse des précipitations mensuelles de l'Ourika à la station d'Aghbalou, sur une période de 34 ans (de 1970-71 à 2003-2004), a permis de cerner la variabilité de ce paramètre.

A l'échelle annuelle, Ourika reçoit à Aghbalou une pluviométrie moyenne de 541 mm par an, le débit moyen est de 5,3 m<sup>3</sup>/s, soit une lame d'eau écoulee de l'ordre de 332 mm (Sidi et al. 2006). La figure suivante met en lumière la répartition moyenne des précipitations et des écoulements mensuels. Le maximum pluviométrique est enregistré aux mois de mars et avril, alors que le pic hydrologique, plus individualisé, est enregistré au seul mois d'avril.

Une autre pulsation pluviométrique est observée, par ailleurs, au mois de novembre, bien que sans grande influence sur l'écoulement superficiel. Une partie des précipitations d'automne tombe en effet sous forme nivale et la fonte massive des neiges accumulées ne commence qu'au début du printemps, en renforçant les débits printaniers et estivaux. Les écoulements importants des mois de mai, juin et juillet sont le résultat de l'addition des précipitations et de la fonte des neiges d'automne et d'hiver. L'Ourika a donc un régime pluvio-nival à hautes eaux de printemps. La fonte des neiges prolonge l'augmentation des débits d'hiver en dessinant un pic au printemps.

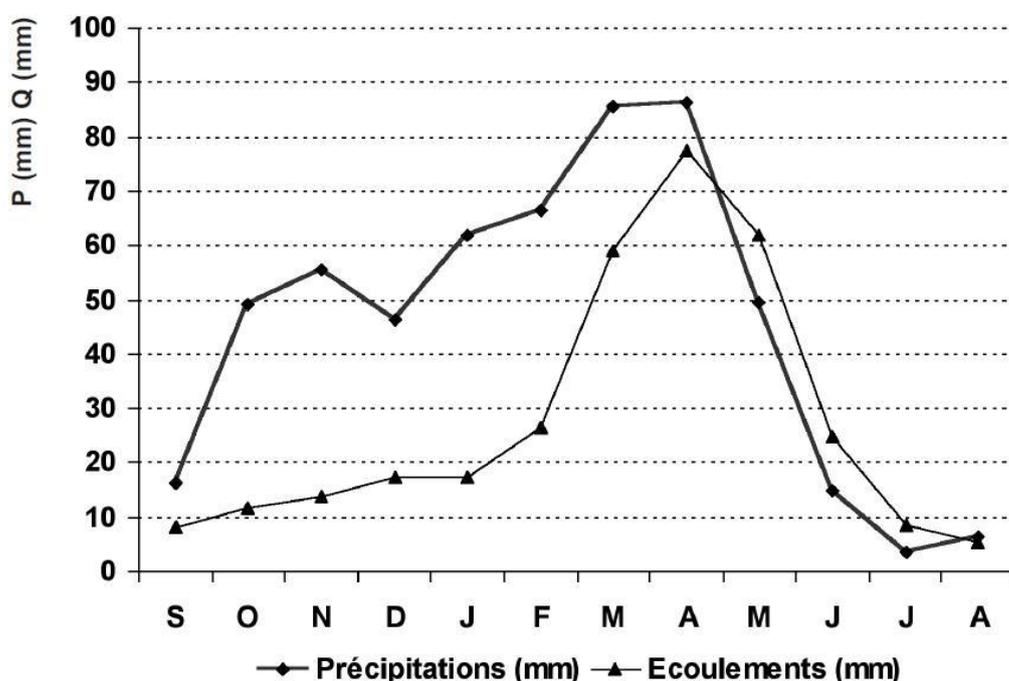


Figure 10 : Variations mensuelles des précipitations et des écoulements à la station d'Aghbalou. (Saidiet al., 2006)

### **II.2.3.2. La température**

La température moyenne fluctue, à l'échelle annuelle, entre 20.3°C et 15.9°C. La moyenne étant de 18°C. A l'échelle mensuelle les mois de juin, juillet et août connaissent les plus hautes températures de l'année avec respectivement des valeurs moyennes de 21,1 °C, 26,9 °C et 26,6 °C.

Le climat est par ailleurs influencé par l'existence des vents secs et chauds. Le chergui souffle de l'Est, généralement en août et septembre. (Saidi M. E., Agoussine M. et Daoudi L., 2006).

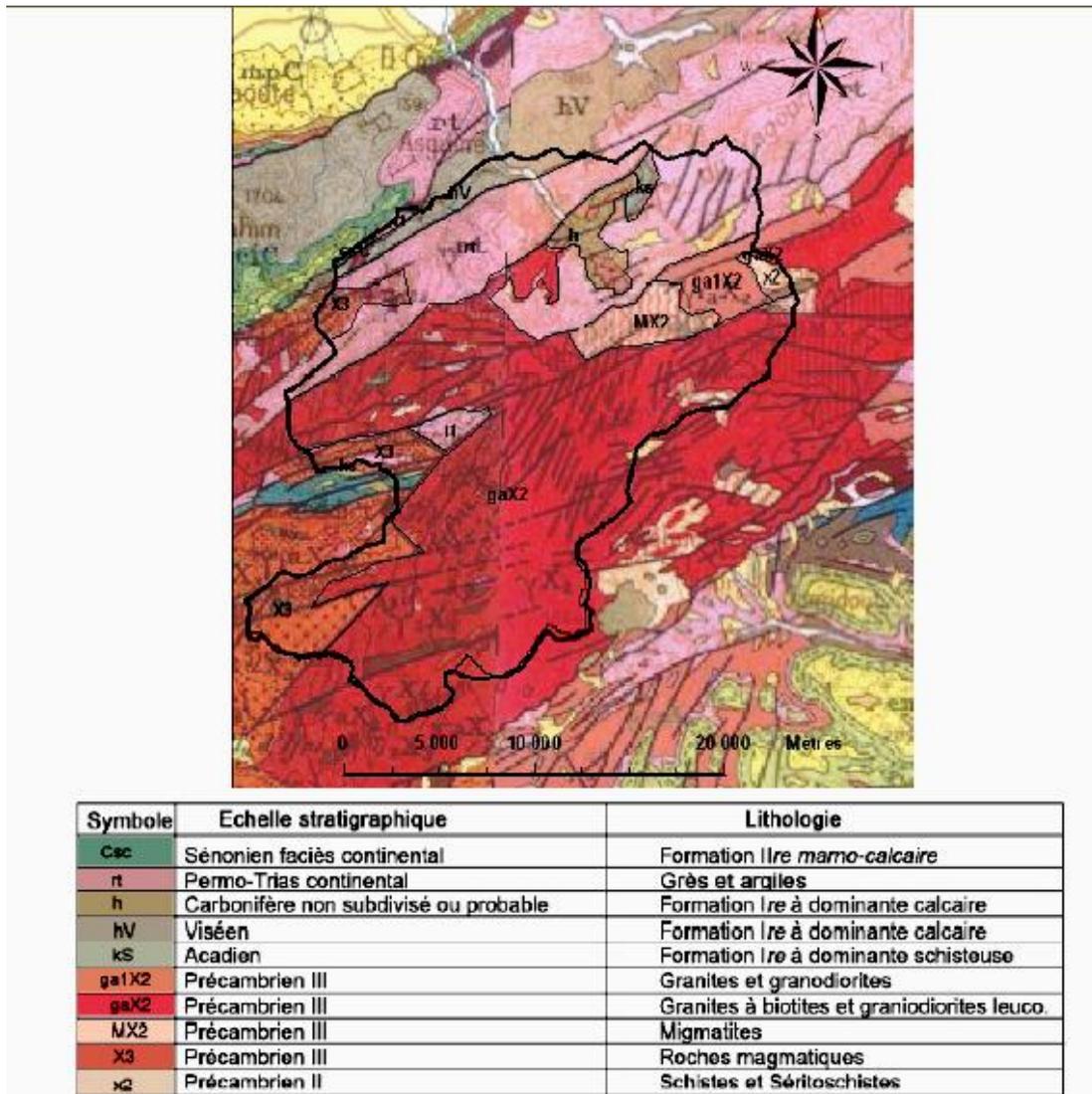
### **II.2.3. Végétation**

A cause de terrains accidentés avec des reliefs imposants et des formations lithologiques cristallines qui affleurent sur une grande partie du bassin, la végétation est limitée à quelques secteurs sous forme des forêts, essentiellement des Chênes verts. On peut aussi citer l'existence des Vergers de pommiers et de noyers qui se trouvent le long de la vallée en colonisant les terrasses alluviales.

### **II.2.4. Cadre géologique**

Sur le plan géologique le bassin versant offre deux grands types de faciès :

- Une partie amont située à des altitudes supérieures à 2000 m constitués de roches magmatiques et métamorphiques qui constituent le socle de la chaîne atlasique. On y rencontre des roches plutoniques (notamment des granites et granodiorite), des roches volcaniques (andésites, rhyolites, etc.) et des faciès métamorphiques (gneiss et migmatites).
  
- Une partie septentrionale: située à des altitudes inférieures à 2000 m, composée des dépôts permo-triasiques et quaternaires plus tendres. La lithologie du permo-trias est composée d'un faciès Nord sub-atlasique formé de conglomérats, grés et siltites ; et d'un faciès Sud du haut plateau, formé essentiellement de siltites argileuses et localement des grés massifs. (Figure 11).



**Figure 11:** La carte géologique du bassin versant de l'Ourika  
(Extraite de carte géologique de Marrakech au 1/500 000)

La lithologie du bassin versant est donc dans l'ensemble assez imperméable. Selon les chiffres de l'agence de bassin hydraulique de Tensift, 6% des sols y sont perméables, 39% semi-perméables et 55% imperméables. Cette lithologie fait croître les risques d'inondations ; elle favorise une augmentation des eaux de ruissellement mobilisées par les cours d'eau principaux et le développement d'importantes crues.

## II.3. Présentation du bassin de Zat

### II.3.1. Situation géographique

L'oued Zat est un affluent atlasique situé sur la rive gauche de l'oued Tensift, appartient au versant Nord de la chaîne du Haut Atlas (Figure 12). Il forme avec l'oued Ourika les deux bras principaux de l'oued Hadjar. Il draine un bassin versant de 526,17 km<sup>2</sup> à la station hydrologique de Taferiat situé à une altitude de 760 m au Sud-Est entre la latitude 31°10' et la longitude 7°10'. Il est délimité au Sud par la zone axiale du Haut atlas, au Nord par la plaine du Haouz, à l'Est par le bassin de R'Dat et à l'Ouest par le bassin de l'Ourika. Il fait partie de la zone la plus active, la plus pentue et la plus arrosée du bassin de Tensift. L'altitude maximale est de 3847 m, l'altitude minimale est de 794 m avec une altitude moyenne de 1831,73. Les altitudes maximales sont localisées au périphérique Sud du bassin, alors que les altitudes les plus faibles se trouvent au centre et au Nord du bassin. L'érosion est donc plus active à la périphérie Sud que dans le reste du bassin.

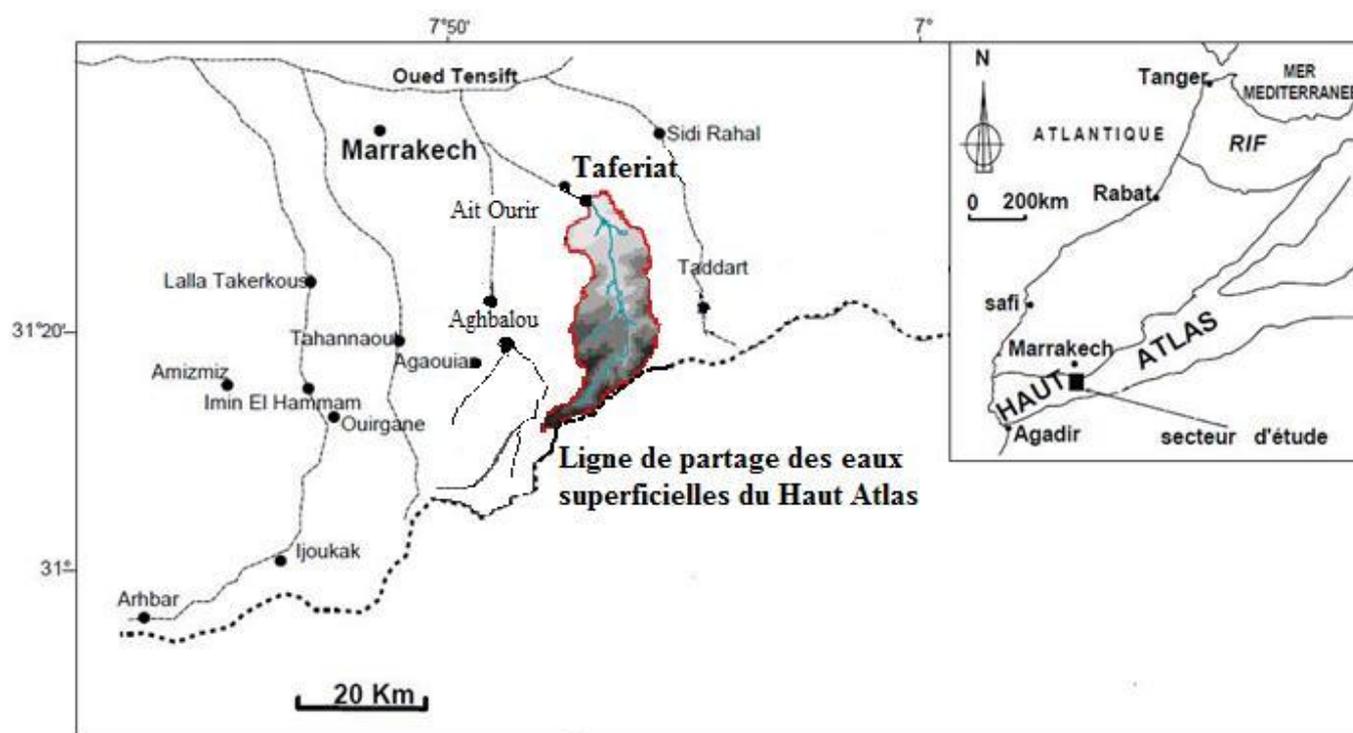
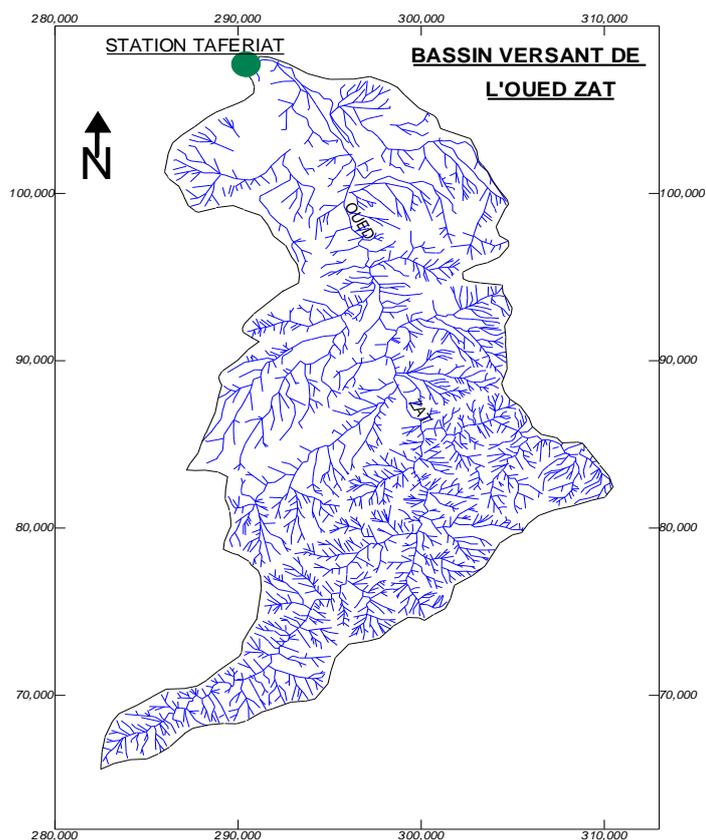


Figure 12 : situation géographique du bassin versant du Zat.

Le réseau hydrographique du bassin de Zat est dense et bien ramifié (figure 13), et les principaux affluents du cours principal étant : oued Ikiys et oued Yagoun sur sa rive gauche et les oueds Zeraoun, Wansa, Tighazrit, Tighadwine, Tidsi et Afra sur sa rive droite.

Le périmètre du bassin versant est de l'ordre de 135 km, ce qui lui donne un indice de compacité ( $K_c = 0,28 P/_S$ ) de l'ordre de 1,66. Il confère au bassin une forme allongée qui aura un impact sur les écoulements et les hydrogrammes observés à l'exutoire.

Le cours principal a une longueur de 55 km et les dimensions du rectangle équivalent étant de 9 Km pour la largeur et de 54 Km pour la longueur. Ces dimensions confirment la forme allongée du bassin versant. (ABH Tensift)



**Figure 13** : réseau hydrographique du bassin de Zat (ABH Tensift)

### ***II.3.2. Cadre climatique et hydrologique***

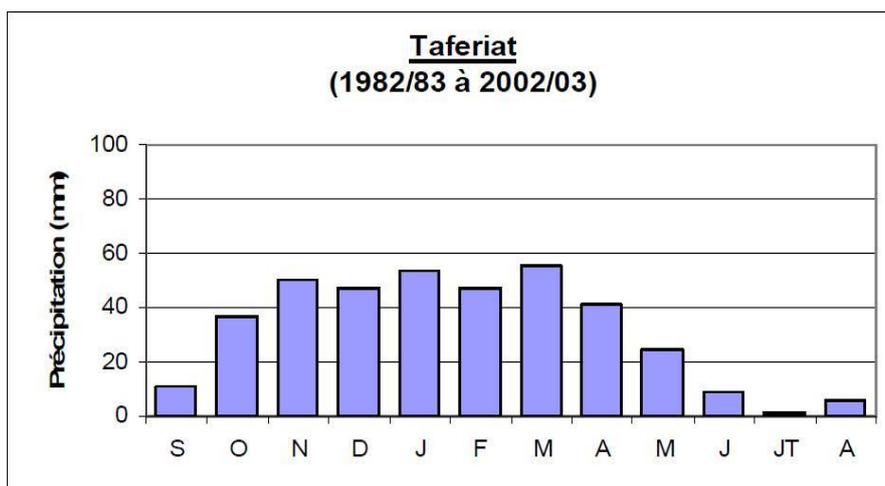
Les données et les mesures hydrologiques et pluviométriques du bassin versant de Zat sont recueillies au niveau des deux stations hydrométriques : Asloum en amont et Taferiat en aval.

La station de Taferiat a été mise en service le 09/02/1962, elle est située à l'exutoire du bassin. L'oued Zat écoule un débit moyen de  $3,574 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit un volume annuel de 113 millions de  $\text{m}^3$ . L'année 1979/80 a enregistré le débit moyen annuel maximum de  $8,830 \text{ m}^3/\text{s}$  alors que l'année 2001/02 a enregistré le débit moyen annuel le plus faible :  $0,532 \text{ m}^3/\text{s}$ . (Ramromi, 2007).

### II.3.2.1. Précipitations

- *Précipitation mensuelle*

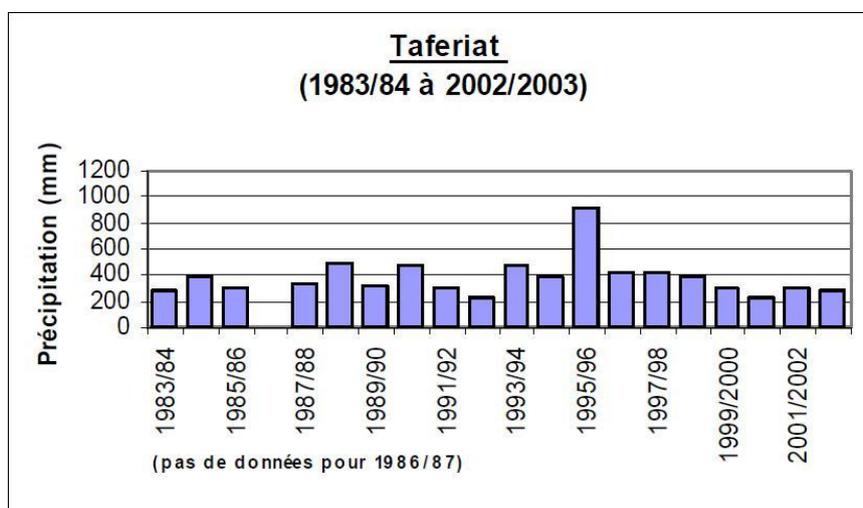
L'histogramme montre la répartition de la pluie tout au long de l'année. La période analysée pour la station de Taferiat est de 20 ans (Figure 14). Les mois les plus pluvieux sont d'octobre à Mars avec un maximum de 55,2 mm en Mars considéré comme le mois le plus arrosé, et que les mois les plus secs sont de Juin à Septembre avec un minimum de 3mm en Juillet le mois le moins arrosé, les précipitations moyennes dans tout le bassin à l'échelle mensuelle sont de 29,22 mm.



**Figure 14 :** précipitation moyenne mensuelle à la station de Taferiat (Ramromi, 2007)

- *Précipitation annuelle*

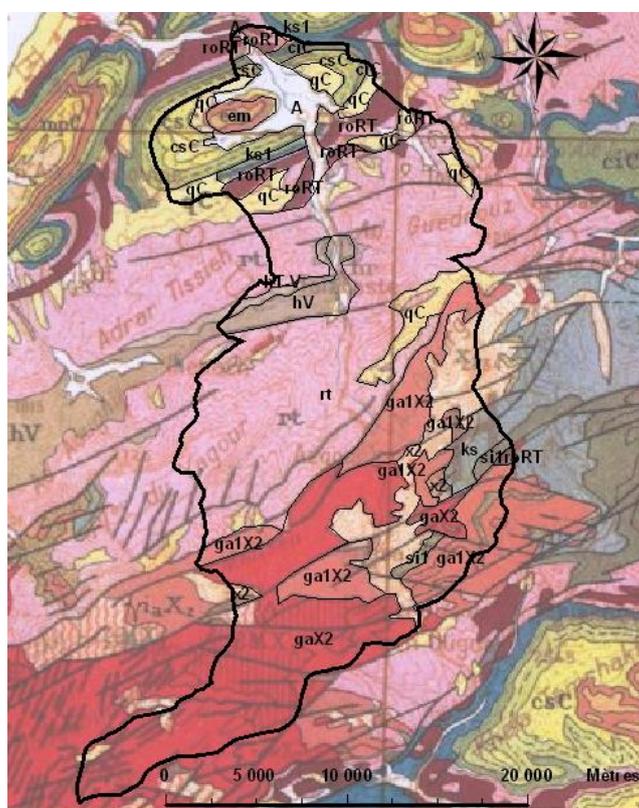
L'histogramme suivant montre l'évolution annuelle des précipitations dans la période de 1983 à 2003 (figure 15). La station de Taferiat a enregistré les précipitations maximales en l'année 1995/96 c'est l'année qui a fait l'exception pendant toute la période. L'année qui été particulièrement sèche, c'est l'année 2000/01 avec des précipitations minimales de 234,6 mm. (Ramromi, 2007)



**Figure 15 :** précipitation moyenne annuelle à la station de Taferiat (Ramromi, 2007)

### II.3.3. Cadre géologique

La figure 16 montre que la série sédimentaire est bien conservée dans les deux tiers nord du bassin. Elle se compose des schistes à Paradoxides du Cambrien, de l'Acadien et de l'Ordovicien dont les faciès sont à dominante schisteuse, du Tournaisien supérieur au Viséen avec des faciès à dominante calcaire, des grès et argiles du Permo-trias, des formations marno-calcaire du Cénomanién et du Sénonien et des formations de plaine IV et III (figure 16). Les roches magmatiques sont localisées au sud du bassin et sont du Précambrien terminal et dans la partie nord une fine bande de dolérites est du Trias. Les roches les plus anciennes sont du Précambrien intermédiaire. Ces roches sont des schistes métamorphisés. Les failles sont de direction NE-SW.



Symbole	Echelle stratigraphique	Lithologie
A	Formations modernes et Quaternaire	Formations de plaine IV et III
qc	Quaternaire moyen et ancien	Formations de plaine IV et III
em	Eocène moyen	Formations de plaine IV et III
csC	Sénonien faciès continental	Formations II marno-calcaire
ciC	Infracénomanién et Cénomanién continental	Formations II marno-calcaire
roRT	Trias	Basaltes doléritiques
rt	Permo-Trias continental	Grès et argiles
hv	Viséen	Formations I à dominante calcaire
hT-V	Tournaisien supérieur - Viséen	Formations I à dominante calcaire
si1	Ordovicien inférieur	Formations I à dominante schisteuse
ks	Acadien	Formations I à dominante schisteuse
ks1	Cambrien moyen	Schistes à Paradoxides
ga1X2	Précambrien III	Granites et granodiorites
gaX2	Précambrien III	Granites à biot. et granodiorites leuco.
x2	Précambrien II	Schistes et Sérítoschistes

**Figure 16:** carte géologique du bassin versant de l'oued Zat (Extraite de carte géologique de Marrakech au 1/500 000)

La chaîne atlasique montre alors suivant une direction nord-est, sud-ouest deux zones distinctes:

- A l'amont, la zone axiale de la chaîne à hautes altitudes où n'affleure que le socle,
- A l'aval, la zone sub-atlasique septentrionale où la couverture post-hercynienne constitue l'essentiel des affleurements.

Dans l'ensemble, la lithologie du bassin du Zat est constituée de 46 % de terrains imperméables, à 40 % de terrains semi perméables et 14 % de terrains perméables (Pascon 1977). Par conséquent, ces formations géologiques favorisent un écoulement superficiel soutenu et éventuellement le développement de crues importantes en cas de pluies conséquentes.

# **Chapitre II : Généralités** **sur l'hydrochimie et** **l'isotopie des eaux**

## **I. Revue bibliographique sur le terme d'isotopie**

### **II.1. Introduction**

Depuis leurs premières utilisations, les isotopes du milieu sont devenus un outil fondamental pour les études hydrologiques et hydrogéologiques. Cependant, les études isotopiques réalisées au Maroc restent très limitées à cause de leur coût important et du manque d'appareillage.

Les applications sont nombreuses, allant de l'adultération des aliments, de la caractérisation des déversements de pétrole. En terme d'hydrogéologie et du cycle de l'eau les isotopes stables et radioactifs du milieu peuvent contribuer à la connaissance des aires de recharge, des conditions aux limites, l'âge des eaux et leur origine, etc.

Le présent projet qui porte sur l'étude de la circulation des eaux du bassin versant de Rhéraya, Ourika et Zat mettra les sciences nucléaires au profit pour répondre aux objectifs fixés au départ. Par le biais de cette étude, le CNESTEN mettra au point et transférera des techniques faisant appel à des isotopes stables et radioactifs.

### **II.2. Techniques isotopiques**

Les traceurs naturels isotopiques permettent d'obtenir des informations concernant l'âge, l'origine des eaux, et leur vitesse d'écoulement. Ces traceurs isotopiques donnent en particulier accès à des indications sur l'origine et le temps de résidence des eaux souterraines, c'est à dire, en termes de gestion, sur les sources d'alimentation du réservoir et sur le taux de renouvellement de l'eau dans ce réservoir.

Les isotopes constitutifs de la molécule d'eau à savoir  $^{18}\text{O}$  ;  $^2\text{H}$  et  $^3\text{H}$  sont caractérisés par le fractionnement isotopique. Ce fractionnement est régi par des phénomènes tels que: l'évaporation, la condensation, et la diffusion d'une part, et par les réactions d'échanges isotopique et cinétique d'autre part. Ces réactions obéissent aux lois d'action de masse. Le degré de fractionnement est une fonction complexe de la température, la pression partielle de la vapeur d'eau au dessus de la phase liquide, et de la salinité.

#### ***II.2.1. Isotopes stables concept et terminologie***

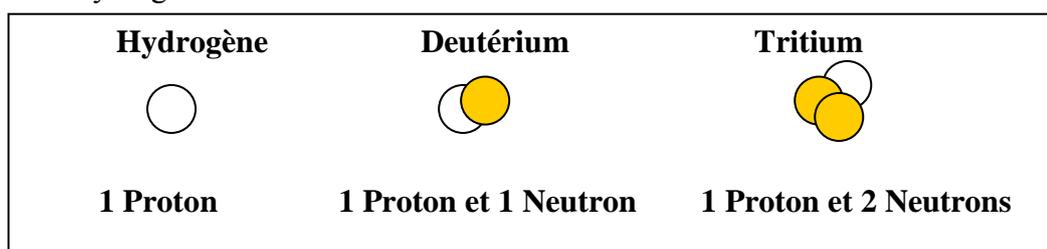
##### **1) Définition des isotopes**

Le noyau d'un atome est constitué en première approche de protons et de neutrons. En physique nucléaire, deux atomes sont dits isotopes s'ils ont le même nombre de protons. Le nombre de protons dans le noyau d'un atome est désigné par le numéro atomique ( $Z$ ). Deux isotopes ont le même numéro atomique. Ce qui distingue deux isotopes est qu'ils ont une masse atomique différente ( $A$ ). La masse atomique d'un atome est le nombre de nucléons que

contient le noyau de cet atome. La différence de masse atomique est donc due à une différence dans le nombre de neutrons N.

Les propriétés chimiques des isotopes d'un même élément sont identiques car ces isotopes ont une même configuration électronique. En revanche, comme le noyau ne comporte pas le même nombre de neutrons, la masse des atomes varie.

Cette différence de masse atomique permet de séparer les isotopes d'un même élément par spectrométrie de masse et ainsi de les distinguer. De plus, la proportion de neutrons dans le noyau peut rendre l'atome instable : c'est pourquoi ils peuvent être radioactifs. Prenons l'exemple de l'hydrogène :



**Figure 17:** les isotopes de la molécule d'eau

Dans ce sens, Craig a défini en 1961 l'expression permettant de donner les teneurs en isotopes stables comme suit :

$$\Delta \delta = \left[ \left( \frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{étalon}}} - 1 \right) \right] \cdot 100\text{‰}$$

R étant le rapport d'abondance isotopique  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,  $^2\text{H}/^1\text{H}$

L'étalon étant la composition isotopique moyenne des eaux océaniques V-SMOW (Standard Mean Ocean Water) d'une valeur égale à 0 ‰.

Ainsi, une valeur négative de  $\delta$  montre un appauvrissement de l'échantillon par rapport à l'étalon et vice versa.

A l'échelle du globe, les eaux naturelles présentent des teneurs en oxygène 18 très variables allant de  $-55\text{‰}$  pour les neiges de l'Antarctique jusqu'à  $+30$  dans les sebkhas sahariennes (Fontes et al, 1967). Il en est de même pour le deutérium ( $-45 \text{‰}$  à  $+150 \text{‰}$ ). Les deux principaux phénomènes responsables de la modification de la composition en oxygène 18 et deutérium sont la condensation et l'évapotranspiration. Ces phénomènes sont thermodépendants : la condensation est un phénomène d'équilibre thermodynamique (Sonntag et al, 1983), alors que l'évaporation s'opère dans des conditions hors équilibre à cause de l'effet cinétique lié aux processus de diffusion moléculaire (Craig et al, 1963 ; Ehhalt e al, 1963 ; Dansgaard, 1964).

## 2) Rapport et abondance isotopique

Les paramètres servant à décrire et mesurer les phénomènes de répartition isotopique sont définis comme suit :

°le **rapport isotopique R**, est égale au quotient de nombre d'isotopes lourds sur le nombre d'isotopes légers d'un élément donné :  $R = \text{Lourd} / \text{Léger}$ .

Ainsi le rapport isotopique de carbone-13 est défini comme :  $R = {}^{13}\text{C} / {}^{12}\text{C}$ , celui de l'hydrogène est  $R = \text{D} / \text{H}$  (ou  $R = {}^2\text{H} / {}^1\text{H}$ ).

°le **rapport isotopique A**, à ne pas confondre avec le nombre de masse, indique la proportion relative de l'isotope lourd considéré. C'est en quelque sorte une « fraction molaire isotopique » :  $A = \text{Lourd} / (\text{Lourd} + \text{Léger})$ .

Par exemple l'abondance isotopique en carbone-13 est :  $A = {}^{13}\text{C} / ({}^{13}\text{C} + {}^{12}\text{C})$ .

Ces deux paramètres (R et A) sont variables d'un composé à l'autre. Cependant, leur valeur peut être difficile à manier, car on observe de faibles variations sur de faibles quantités. On préfère alors exprimer cette même réalité physique à l'aide d'un troisième paramètre, quant à lui relatif, appelé déviation isotopique d, définie comme :

$$d(\text{‰}) = 1000 \cdot (\text{Rech} - \text{Rréf}) / \text{Rref} \text{ (valeur en ‰)}$$

Où Rech et Rréf sont respectivement les rapports isotopiques de l'échantillon à mesurer et de l'échantillon de référence.

Cette grandeur permet, en utilisant des références internationales, d'apprécier de faibles différences de teneurs isotopiques, mais aussi de réaliser une intercalibration entre appareil de mesure et entre laboratoires.

## 3) Fractionnement isotopique

Le concept de fractionnement isotopique rend compte des variations dans la répartition des isotopes d'un élément. De façon simple, l'expression « fractionnement isotopique » correspond simplement à la répartition des isotopes d'un élément. Par exemple, pour l'oxygène, les trois isotopes naturels donnent le fractionnement suivant :  ${}^{16}\text{O}$  pour 99,762 % de l'oxygène,  ${}^{17}\text{O}$  pour 0,038% et  ${}^{18}\text{O}$  pour 0,2%. De façon plus précise, le fractionnement exprime une répartition entre deux groupes d'isotopes, selon qu'ils sont « légers » ou « lourds ». Par ailleurs, la répartition normale des isotopes obéit à un ensemble de lois physico-chimiques qui ont pour conséquences une surabondance des isotopes stables et légers ( ${}^{16}\text{O}$ ) par rapport à leurs homologues lourds ( ${}^{17}\text{O}$ ) et le plus souvent instables. Dans tous les cas, ces variations sont très faibles mais mesurable.

Un fractionnement isotopique correspond soit à un enrichissement soit à un appauvrissement d'un composé ou d'une matière donnée. Lors d'un phénomène physique de filtration (infiltration d'un fluide à travers une roche, transport de la sève dans une plante, évaporation de l'eau dans un lac), l'isotope le plus léger réagira le plus vite. De même, lors d'une réaction chimique (entraînant la réaction des réactifs et formation des produits), l'isotope le plus léger réagira plus vite, et les produits formés au cours de cette réaction seront donc préférentiellement enrichis en cet isotope. Le rapport isotopique peut donc varier entre les états initial et final, et on parle alors de fractionnement isotopique. Ainsi, lors d'un phénomène biologique on peut avoir à la fois des phénomènes physiques et/ou biochimiques, c'est le cas de la discrimination isotopique du carbone lors de la photosynthèse.

Un fractionnement isotopique se traduit alors par un partage inégal des espèces isotopiques  $\alpha$  d'un même élément entre les deux phases.

$\alpha$  est le quotient entre les rapports isotopiques de ces deux phases :

$$\alpha_{1-2} = R(\text{phase 1}) / R(\text{phase 2})$$

$\alpha$  est proche de 1, il est thermodépendant et s'exprime généralement par rapport à la grandeur mesurée delta :

$$\alpha_{1-2} = (1000 + \delta_1) / (1000 + \delta_2)$$

○ **Le facteur d'enrichissement ( $\epsilon$ ),**

Le plus souvent le facteur de fractionnement  $\alpha$  est proche de l'unité. De ce fait le facteur d'enrichissement ( $\epsilon$ ) est d'un emploi plus facile. C'est la raison pour laquelle on exprime le facteur  $\epsilon$  en part pour mille. Cette valeur est appelée:

-Facteur d'enrichissement, exprimée par:

$$\epsilon_{1-2} (\text{‰}) = (\alpha_{1-2} - 1) \times 1000 \approx \delta_1 - \delta_2$$

$\epsilon$  peut prendre des valeurs positives ou négatives, et on peut en obtenir une approximation en reprenant la définition de  $\alpha$  et en tenant compte du fait que  $\delta$  est très petit devant mille par:

$$\epsilon = \delta_1 - \delta_2$$

Isotope léger et abondant	Isotope lourd et rare	Abondance moyenne (ppm)	Formes habituellement analysées en hydrologie
Hydrogène= 11H	Deutérium=21H Tritium= 31H	200 10-11	H2O (l)
Oxygène= 168O	Oxygène-18= 188O	2000	H2O(l),CO2(g),HCO3-(aq),CaCO3(S),SO42-(aq), SO4Ca(g), 2H2O(s)
Carbone = 126C	Carbone-13= 136C Crbone-14=146C	10000 10-6	CO2(g), HCO3-(aq), CaCO3(s), CH4(g)
Azote= 147N	Azote-15= 157C	4000	NO3-(aq), NH4+(aq)
Soufre= 3216S	Soufre-34= 3416S	40000	SO42- (aq), H2S(aq), FeS2(s), SO4Ca, 2H2O(s)

**Tableau 4:** les différents isotopes existants dans le milieu naturel

### II.2.2. Isotopes stables : cas de $^{18}\text{O}$ , $^2\text{H}$ et $^{13}\text{C}$

#### 1) Relation : $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$

A l'échelle planétaire, les océans forment le réservoir principale qui est à l'origine de la presque totalité de la vapeur atmosphérique responsable des précipitations. La connaissance des teneurs isotopiques de ces dernières permet de remonter à l'origine des eaux souterraines, leur mode de recharge, ainsi que les mélanges éventuels qui peuvent se produire entre les différents types d'eau. D'une façon générale, aussi bien sur terre que sur les océans, les teneurs en  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  des eaux de pluies vérifient la droite des eaux météoriques mondiales (DMM) de Craig (1961), dont l'expression est :  $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \text{ ‰ SMOW}$ , appelée GMWL (Global Météorique Water Line). Cependant, localement et notamment dans les mers fermées et sur les continents où le recyclage de la vapeur est important, l'excès en deutérium ( $d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ ) peut dépasser 10 (Nir, 1967). Celle des eaux de la Méditerranée orientale présente un excès en deutérium de 22 ( $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 22 \text{ ‰ SMOW}$ ), (Gat et Yourtsever, 1981).

## ☞ Standards internationaux

Toute espèce chimique est exprimée par rapport à un standard approprié conventionnellement admis. L'étalon utilisé pour le deutérium ( $^2\text{H}$ ) et l'oxygène-18 ( $^{18}\text{O}$ ), est le SMOW ou le Vienna SMOW (eau océanique moyenne).

Les teneurs en espèces chimiques du SMOW ou VSMOW, sont des standards fixés d'après l'analyse d'un échantillon moyen d'eau de l'océan Atlantique, prélevé à la verticale d'un lieu situé à  $0^\circ$  de latitude et  $0^\circ$  de longitude, et dont la composition isotopique est:

$$\delta^{18}\text{O} = 0 \text{ ‰} \text{ et } \delta^2\text{H} = 0 \text{ ‰}$$

Le standard, VSMOW, est distribué par l'AIEA aux différents laboratoires qui sont appelés à exprimer les résultats d'analyses par rapport au VSMOW (Gonfiantini, 1984).

Pour le  $^{13}\text{C}$ , l'étalon international, est le PDB (Peedee Belemnite americana) ; une calcite biogénique marine (rostre de la Belemnite Americana de 'la Peede formation') du crétacé supérieur de la Caroline du sud aux USA (Craig, 1957).

### 2) Carbone-13 ( $^{13}\text{C}$ ) : indice de l'échange isotopique

L'intérêt essentiel des mesures des teneurs de  $^{13}\text{C}$  est de permettre de différencier les sources de carbone entrant en jeu. La teneur en  $^{13}\text{C}$  du  $\text{CO}_2$  du sol est indispensable, car ce  $\text{CO}_2$  participe chimiquement et isotopiquement à l'acquisition du carbone inorganique total dissous (CITD) par l'eau qui traverse la zone non saturée du sol.

A partir du réservoir atmosphérique, le  $^{13}\text{C}$  est assimilé par les plantes et participe dans le cycle du carbone et les différents réservoirs de la même façon que le  $^{14}\text{C}$ . Chaque réservoir est caractérisé par une teneur en  $^{13}\text{C}$  de l'élément carboné par rapport au PDB (effet réservoir).

Les échanges entre les divers réservoirs de carbone entraînent des variations dans leur composition isotopique. Ces variations sont la conséquence du fractionnement isotopique entre les différentes phases échangeant du carbone.

Les mesures des teneurs en  $^{13}\text{C}$  des différents composants du carbone dissous, rend possible l'investigation, et dans une certaine mesure l'évaluation des mécanismes d'échange.

En effet, les coefficients de fractionnement isotopiques des réactions d'équilibre du système:  $\text{CO}_2 \text{ - HCO}_3^- \text{ - CO}_3^{2-}$  sont bien établis dans la littérature et le montant de l'échange des isotopes entre  $\text{CO}_2$  gazeux et le CITD peut être évalué.

Les réactions d'échanges impliquent également le  $^{14}\text{C}$ , et il est généralement admis que le fractionnement isotopique pour  $^{14}\text{C}$  est lié à celui que l'on relève pour  $^{13}\text{C}$ , par la relation établie par Craig (1954) et précisée expérimentalement par Salliège et Fontes (1983), soit:

$$\varepsilon^{14}\text{C} \approx 2,3 * \varepsilon^{13}\text{C}$$

Puisque les teneurs en carbone-14, sont exprimées en pour cent, et que les teneurs en carbone-13 sont en parts pour mille, il vient que:

$$\varepsilon^{14}\text{C}\% \approx 0,23 * \varepsilon^{13}\text{C}\text{‰}$$

Avec:  $\varepsilon = \delta 2 - \delta 1$

Les valeurs numériques des différentes ( $\varepsilon$ ), ainsi que leurs variations en fonction de la température ont été déterminées expérimentalement (Mook et al, 1974; Vogel et al, 1970).

Les relations s'inscrivent sous forme approchée valable pour le domaine des températures de l'hydrosphère froide et tiède.

$$\delta\text{CO}_2(\text{g}) - \delta(\text{HCO}_3^-) \approx \varepsilon * [\text{CO}_2(\text{g}) - \text{HCO}_3^-] = -9483 / T + 23, 89$$

$$\delta(\text{H}_2\text{CO}_3) - \delta(\text{HCO}_3^-) \approx \varepsilon * [\text{H}_2\text{CO}_3 - \text{HCO}_3^-] = -9866/T + 24, 12$$

$$\delta(\text{Calcite}) - \delta(\text{HCO}_3^-) \approx \varepsilon * [\text{calcite} - \text{HCO}_3^-] = -4232/T + 15,10$$

Si l'on veut par exemple transposer à l'activité en carbone,  $A^{14}\text{C}$  on écrira:

$$A^{14}\text{C}(\text{HCO}_3^-) = A^{14}\text{C}(\text{CO}_2) - \varepsilon^{14}\text{C}(\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^-)$$

C'est à dire:  $A \text{ atm} / A \text{ CITD} = 1 + \varepsilon^{14}\text{C}$

En introduisant  $\varepsilon^{14}\text{C}\% \approx 0,23 * \varepsilon^{13}\text{C}\text{‰}$

$$A^{14}\text{C}(\text{HCO}_3^-) = A^{14}\text{C}(\text{CO}_2) - 0,23 * \varepsilon\text{C}(\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^-)$$

Ainsi, à l'équilibre complet avec le  $\text{CO}_2$  atmosphérique antérieur aux essais nucléaires, le bicarbonate se trouvera enrichi en carbone-14 sous l'effet du fractionnement isotopique.

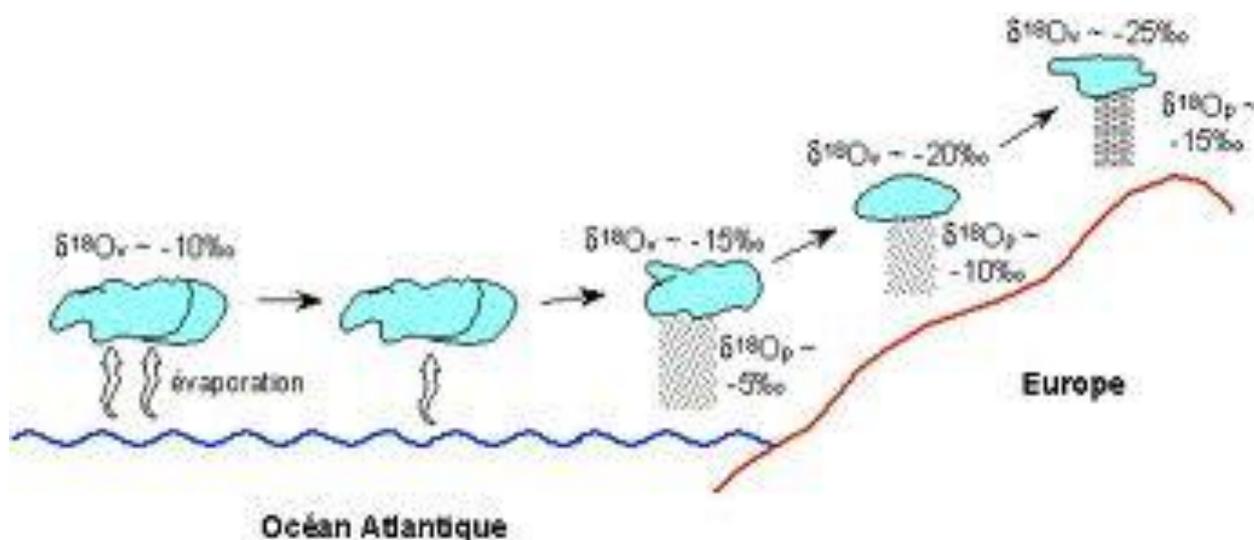
### ***II.2.3. Isotopes radioactifs : Tritium et Carbone-14***

La détermination des temps de résidence des eaux se fonde sur l'interprétation des teneurs en tritium et en carbone-14 des eaux actuelles, comparées à celles connues dans les précipitations sur chronique assez longue, comprenant en particulier les années caractérisées par les essais thermonucléaires.

Le tritium permettra également de justifier l'étude du couple ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ), pour attribuer un « âge » des eaux.

Le tritium est un radiotracteur relativement idéal puisqu'il fait partie intime de la molécule d'eau ; toutefois sa décroissance rapide ne permet pas l'exploration de temps de séjour prolongé (=60 ans environ). Par conséquent, son utilisation comme traceur radioactif se limite aux cycles hydrologiques relativement courts.

Le carbone-14 repousse les limites de « datation » des eaux à environ 35 000 ans dans le cas des systèmes clos. Toute datation au carbone-14 devra être discutée avec le  $^{13}\text{C}$  traceur des mécanismes des origines du carbone.



**Figure 18:** Cycle de l'eau avec les variations des teneurs isotopiques

Il est possible de suivre l'évolution et le cheminement de l'eau aux différents stades de son cycle, grâce aux isotopes stables  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  marqueurs intimes de la molécule d'eau. Ainsi selon l'environnement, l'eau acquiert des « empreintes » isotopiques qui aident à l'identification et en établir l'origine.

#### ***II.2.4. Application de la relation: $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$***

Les isotopes stables de la molécule d'eau  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  sont utilisés en hydrogéologie comme traceurs du milieu. Les teneurs en isotopes stables ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ) font l'objet de mesures relatives. D'après la définition de Craig (1961), elles sont exprimées en unité delta ( $\delta$ ) et données en partie pour mille de différence par rapport à un standard international de référence le SMOW :

$$\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + d$$

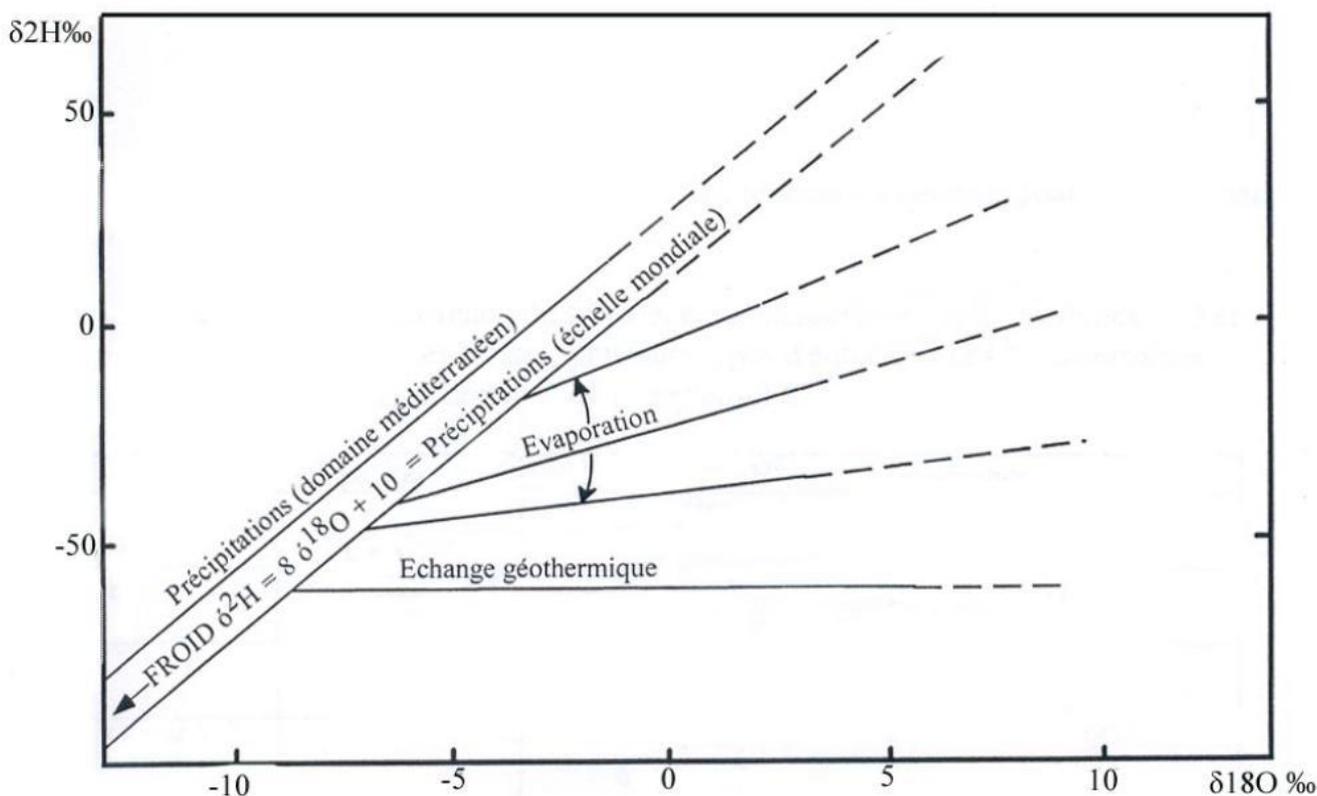
La constante « d » dite excès deutérium varie en fonction de l'origine des précipitations. Elle est proche de 10 dans les régions sous influence directe des perturbations océaniques (Craig 1961 ; Dansgaard, 1964) et peut prendre des valeurs supérieures à 10 montrant ainsi que la vapeur d'origine océanique a été alimentée par une évaporation continentale ou en provenance des mers fermées.

Ainsi, NIR a établi en 1967 la relation  $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 22$  pour les bassins orientaux de la Méditerranée, alors que Fontes et Zuppi (1974) ont calculé un  $d=14,5$  pour le Latium (Italie).

Lorsque les phénomènes d'évaporation n'interviennent pas, la pente reste constante. Cependant, dans un même environnement climatique, une influence par l'évaporation présente une droite de corrélation dont la pente est plus faible que la droite météorologique mondiale (MMD) ou "droite de Craig" (Figure 19)

$$\delta^2\text{H} = a \delta^{18}\text{O} + b$$

Avec  $3 < a < 8$  et  $b < 10$



**Figure 19:** Relation Deutérium ( $^2\text{H}$ ) et Oxygène-18 ( $^{18}\text{O}$ ) (Craig, 1961)

○ **Effet de la température**

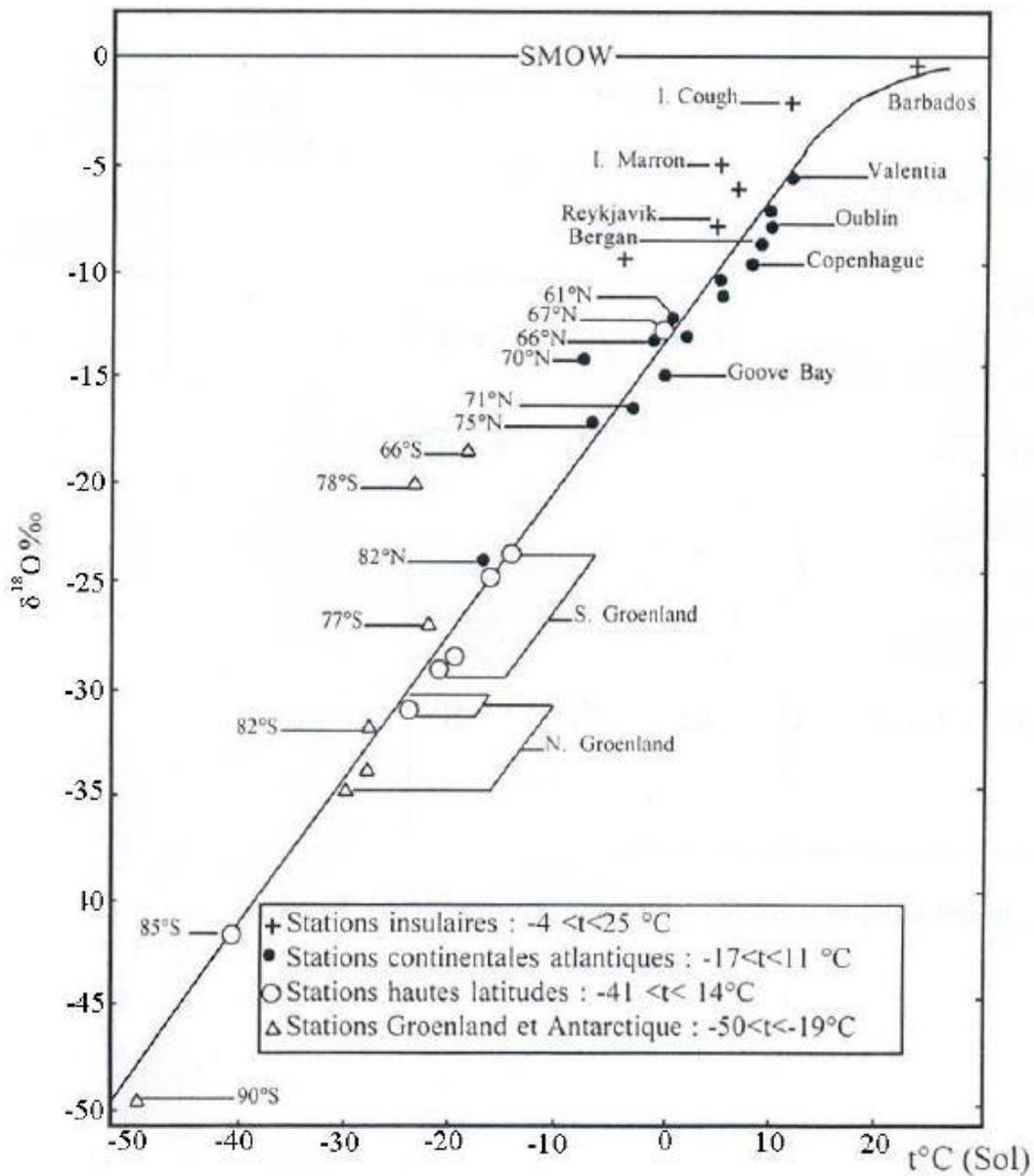
Le fractionnement est une réaction thermodynamique, il croit généralement quand la température augmente.

Dans la pratique, la première relation de ce type a été établie par Dangaard en 1964 à partir de données de température de surface et d'oxygène-18 (moyenne annuelle pondérée) mesurés pour des stations océaniques froides du réseau AIEA :

$$\delta^{18}\text{O} = 0,659T \text{ annuelle} - 13,6 \text{ ‰}$$

$$\delta^2\text{H} = 5,6T \text{ annuelle} - 100 \text{ ‰}$$

Cette relation, bien qu'obtenue à partir d'une chronique très courte, a été confirmée par de nombreuses études postérieures.



**Figure 20 : Relation Oxygène\_18-Température (Dangaard, 1964)**

### ○ Effet de l'humidité de l'atmosphère

L'influence de l'humidité atmosphérique sur la composition isotopique des pluies intervient tout au long du cycle hydrologique : formation des masses d'air, recharge en cours de trajectoires, échanges avec l'humidité ambiante ou évaporation au-dessous de la base des nuages.

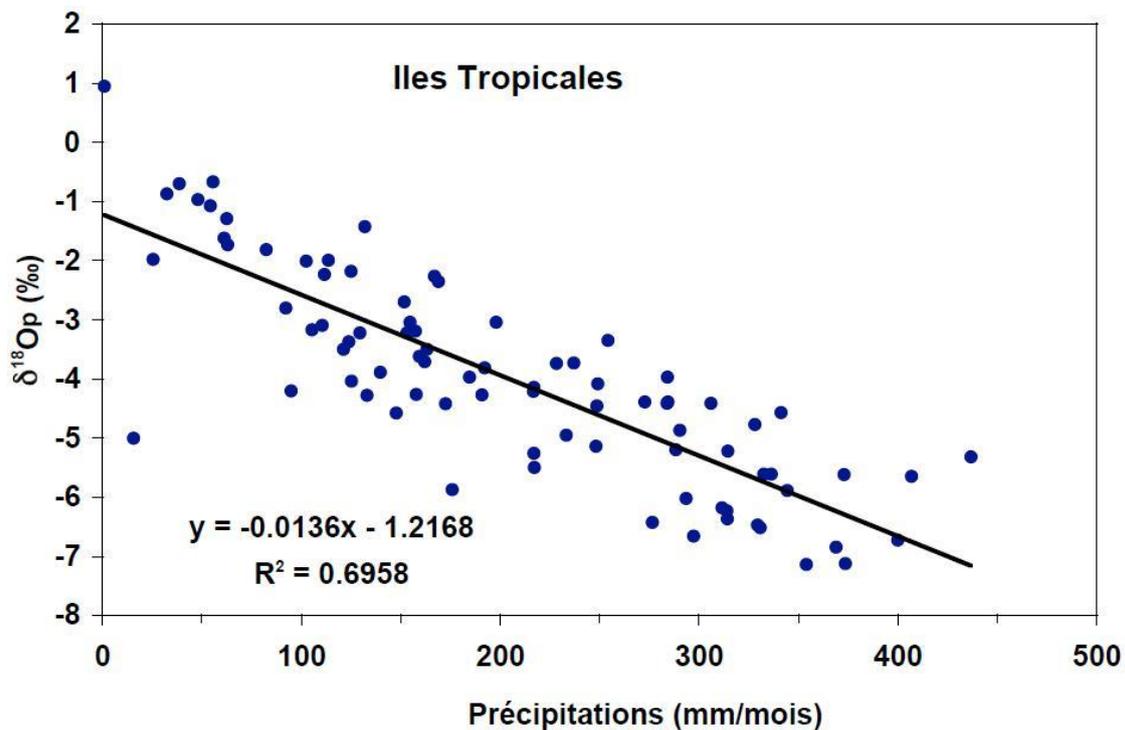
L'évolution de la composition isotopique au cours du cycle hydrologique commence par l'évaporation au dessus des océans et la formation des masses d'air. Celles-ci seront donc fortement marquées par leur origine. Au cours de la trajectoire des masses d'air, il peut par ailleurs se produire des recharges à partir d'évaporation au dessus des eaux de surface ou d'évapotranspiration sur les zones forestières denses.

### ○ Effet de masse

L'effet de masse correspond à l'appauvrissement en isotopes lourds avec l'augmentation de la quantité de pluie (Figure 19). À l'échelle de l'averse, on distingue deux phénomènes à l'origine de cet effet, en relation avec la durée et l'intensité des précipitations (Blavoux, 1978).

D'une part, l'enrichissement des petites pluies est lié à l'évaporation des gouttes de pluie dans l'atmosphère sous saturée sous la base des nuages. Lorsque, en cours de pluies, l'atmosphère atteint un état proche de la saturation, le processus d'échange devient prédominant et la composition isotopique de la pluie correspond alors à celle de la vapeur avec laquelle elle est en équilibre.

D'autre part, lors d'une grosse pluie, les stades de condensations successives font appel à des parties de plus en plus hautes du nuage jusqu'en milieu d'averse ou l'intensité maximale. La température diminue avec l'altitude et les pluies sont donc de plus en plus appauvries. En début et en fin d'épisode, les basses couches nuageuses sollicitées contribuent à produire une pluie plus enrichie.



**Figure 21:** Relation  $\delta^{18}O$ –Précipitations (Blavoux ,1978)

À l'échelle du globe, de nombreux processus tenant compte de la situation géographique sont à la base de la relation entre les facteurs météorologiques (température, humidité atmosphérique, hauteur de pluie) et isotopes stables. Il existe en effet un marquage des précipitations en fonction de la latitude, de l'altitude, de la saison et de la continentalité.

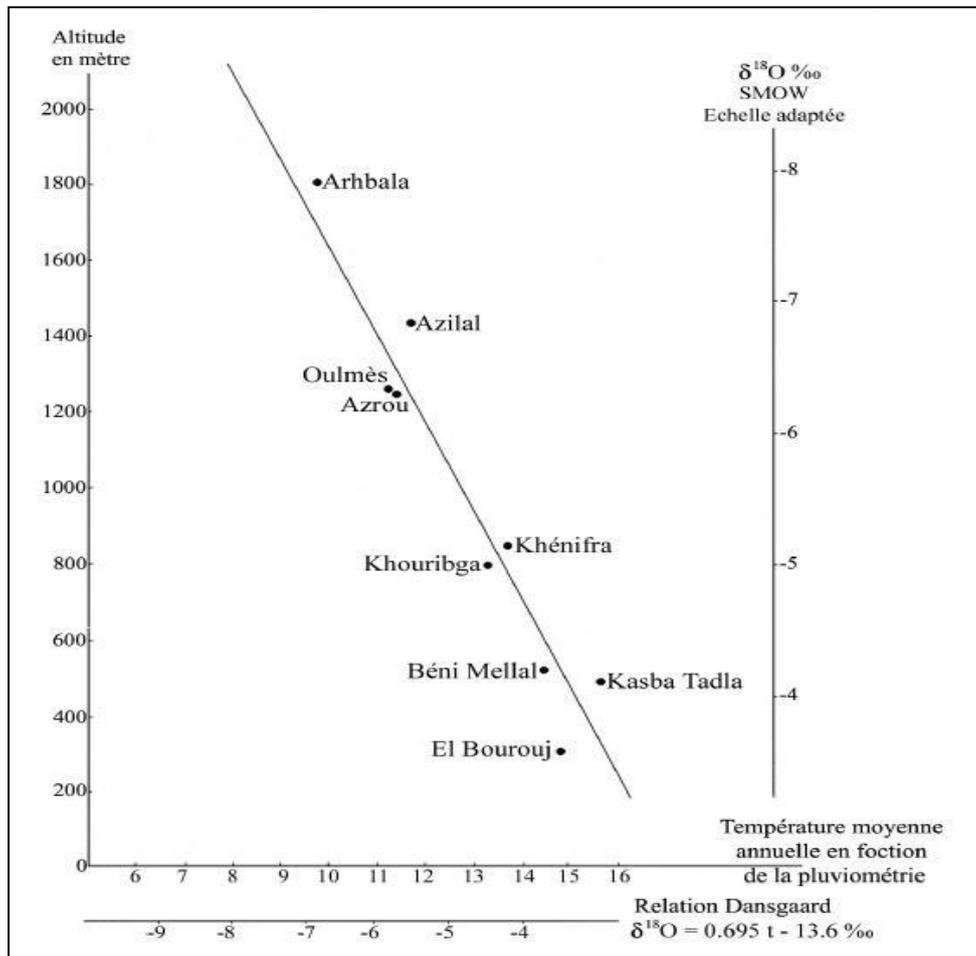
#### ○ Effet des variations saisonnières

☞ Sous les moyennes et les hautes latitudes, les teneurs isotopiques dans les précipitations mensuelles sont corrélées avec la température. Les variations saisonnières de la température provoquent alors des changements au niveau de l'eau totale précipitée dans l'atmosphère selon l'importance des pluies venant des masses d'air polaire.

☞ Sous les basses latitudes, la composition isotopique est modelée par les variations saisonnières du volume précipité. Durant la saison pluvieuse, la précipitation est isotopiquement appauvrie.

#### ○ Effet d'altitude

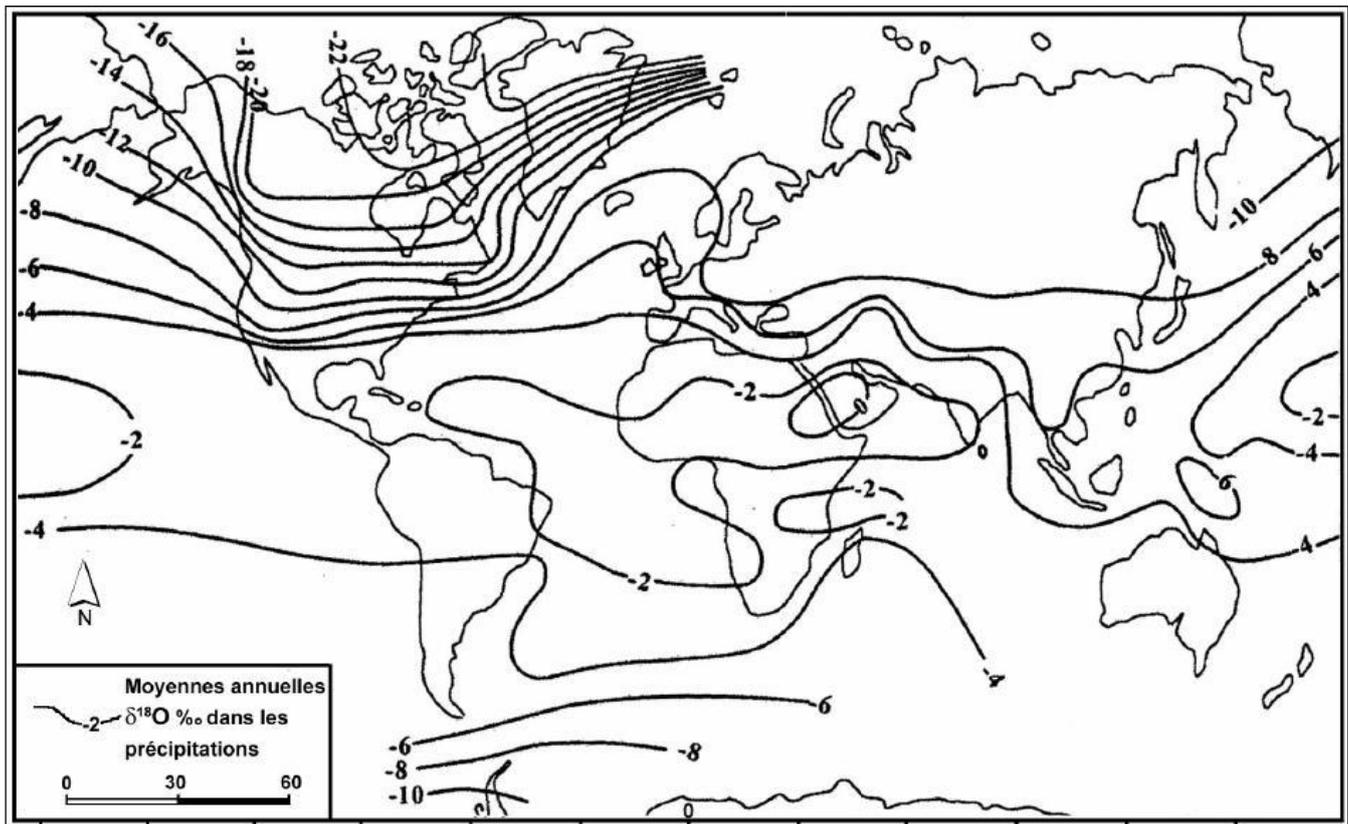
Le gradient altitudinal est établi à partir des mesures des teneurs en isotopes des précipitations collectées à différentes altitudes sur une longue période. En étudiant les précipitations au Maroc à différentes altitudes de la chaîne atlasique, Marcé (1975) avait déterminé un gradient altimétrique de  $-0,38\text{‰ }^{18}\text{O} / 100\text{m}$ .



**Figure 22:** Droite de Marcé (Marcé, 1975)

○ **Effet de la latitude**

La distribution des teneurs moyennes en oxygène 18 des précipitations mondiales (figure 23) varie en fonction de la latitude. Les précipitations de haute latitude sont plus appauvries en oxygène 18. La figure 23 montre que la composition isotopique moyenne des précipitations au Maroc est comprise entre -2 et -4 ‰. D'ailleurs, Marjoua et al., 1997 ont pu retenir des moyennes de  $-4 \pm 0.5$  ‰ pour l'oxygène 18 et de  $-23 \pm 2$  ‰ pour le deutérium comme caractéristiques isotopiques des précipitations au niveau des stations océaniques

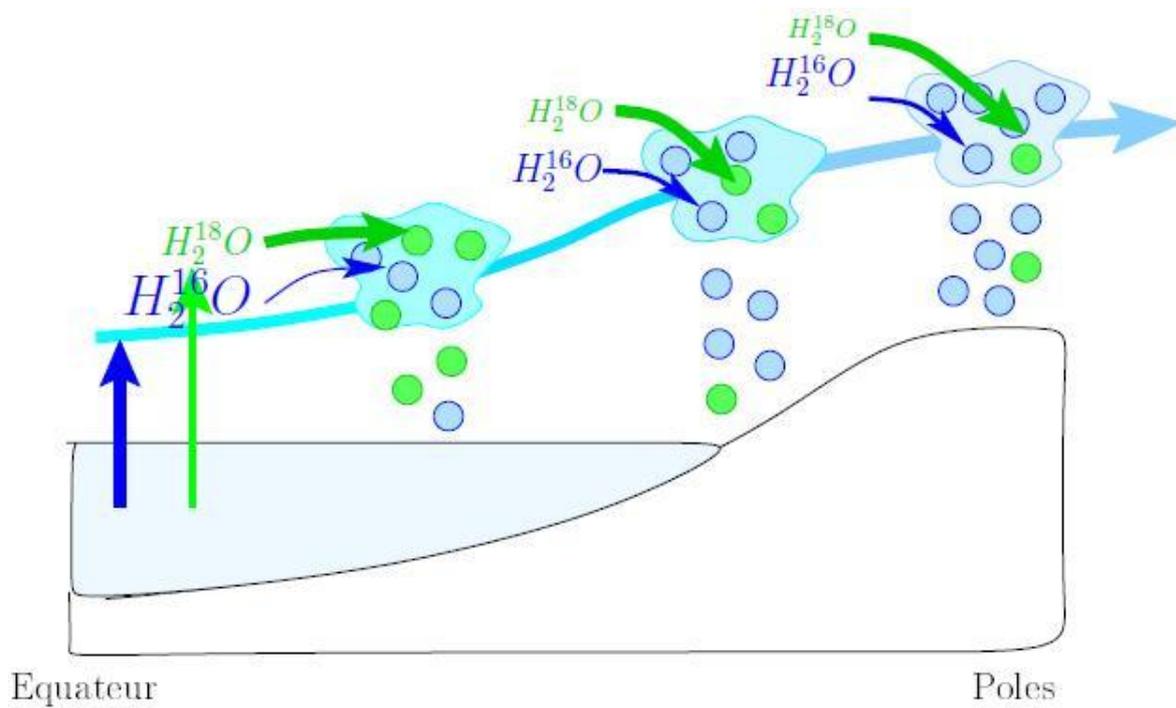


**Figure 23:** Distribution mondiale des teneurs en  $^{18}\text{O}$  des précipitations (AIEA, OMM) d'après Yutsever et Gat (1981)

#### ○ Effet de continentalité

Mis à part la distribution zonale des teneurs, on observe un appauvrissement des précipitations le long des trajectoires des masses d'air sur les continents. Par exemple, les précipitations sont de plus en plus pauvres lorsqu'on va vers l'Est sur le continent eurasiatique. C'est l'effet de continentalité (continental effect). En effet, au fur et à mesure du transport des masses d'air sur le continent, une partie de la vapeur précipite, appauvrissant la vapeur par distillation de Rayleigh. Sur l'océan, l'évaporation forte en surface permet de compenser cet appauvrissement, en réinjectant de l'eau relativement riche. Mais sur le continent, une partie de la précipitation est définitivement perdue sous forme de ruissellement.

L'effet de continentalité est ainsi moins marqué sur l'Amazonie, où le recyclage des précipitations par évaporation de surface est plus fort (Rozanski et al, 1993). Aux moyennes et hautes latitudes se surimpose à l'effet de continentalité l'effet de température, avec des températures plus froides en hiver à l'intérieur des continents.



**Figure 24 :** Schéma illustrant l'appauvrissement de la vapeur et des précipitations quand une masse d'air se dirige vers les pôles.

### II.2.5. Les applications des isotopes de l'eau

Les principaux domaines d'applications des techniques isotopiques en hydrogéologie sont résumés ci-dessous :

Elles permettent de :

- Déterminer la recharge qualitative et quantitative
- Localiser les zones de recharge
- Détecter la relation entre les eaux de surface et les eaux souterraines
- La mise en évidence des phénomènes de drainage et de mélange entre les aquifères
- D'étudier l'hydrologie des roches fracturées, carbonatées (karst), non carbonatées
- D'estimer le temps de transit "âge des eaux"
- D'étudier le mécanisme de la salinisation.

## **II. Les concepts de base de géochimie**

### **II.1. Généralités**

On distingue dans la nature trois grandes familles de roches: sédimentaires, magmatiques, et métamorphiques. Ces roches peuvent être cohérentes (le granite), meubles (sables et galets), plastiques (argiles) et liquides (le pétrole). Elles sont constituées d'un assemblage de différents éléments en grains appelés minéraux. L'étude de ces minéraux constitue la minéralogie.

Les minéraux sont habituellement classés en deux grands groupes: les silicates et les minéraux non silicatés. Les silicates, très abondants, constituent en poids presque 90 % de la croûte terrestre. Les silicates les plus communs sont:

- ⊕ Le quartz ( $\text{SiO}_2$ ),
- ⊕ Les feldspaths, qui regroupent deux familles (les feldspaths potassiques: l'orthose) et les plagioclases (albite et anorthite),
- ⊕ Les micas, qui regroupent deux variétés dont les micas noirs (biotite) et les micas blancs (muscovite),
- ⊕ Les pyroxènes, qui forment une très grande famille avec plusieurs variétés,
- ⊕ Les amphiboles, formant également une très grande famille (olivines).

Les minéraux non silicatés, sont volumétriquement très réduits par rapport aux silicates. Leur concentration locale donne naissance à des gisements de substances utiles ou de minerais souvent, d'un très grand intérêt économique: la calcite, gypse, pyrite, fluorine, la barytine, la halite, la malachite, la blende etc.

### **II.2. Rappels des principes de base de géochimie**

Dans certaines conditions de température, pression, déficit en sel et l'état hydrique du sol, il se produit une dissociation des minéraux qui engendrent dans l'eau du sol des groupements ioniques. De cette mise en solution des sels, résultent différents phénomènes dont l'adsorption et l'échange ionique.

#### ***II.2.1. Adsorption***

L'adsorption est par définition un phénomène de surface. Par action des forces d'attraction et de répulsion existantes entre les ions ou les molécules des différentes phases, certains cations et anions se trouvent fixés sur la surface des éléments solides du milieu.

Dans la nature, les argiles et les colloïdes présentent de grandes surfaces spécifiques et sont électriquement chargés. Leur charge globale est le plus souvent négative. Quand ces

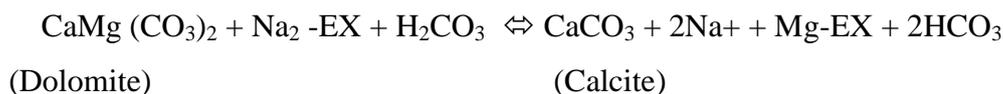
particules se trouvent en présence de solutions renfermant des ions, ceux-ci vont être attirés par ces particules, une partie y sera adsorbée. Les colloïdes et les argiles fortement chargés fixent préférentiellement les ions bivalents.

La facilité avec laquelle un ion adsorbé peut être remplacé par un autre, où l'ordre observé pour les cations alcalins et alcalino-terreux est  $\text{Na} < \text{K}, \text{Mg} < \text{Ca}$ . Plus un ion est gros, plus il est difficile de lui en substituer un plus petit.

Les énergies de liaisons entre ions adsorbés et support sont assez faibles, si la composition de la solution change, des ions primitivement fixés peuvent être désorbés et remplacés par d'autres: c'est le phénomène d'échange ionique ou de base.

### ***II.2.2. Echange ionique***

Ce phénomène plus connu avec l'argile, se produit souvent sur les argiles de l'aquifère par fixation des alcalino-terreux ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) et libération de sodium ( $\text{Na}^+$ ):



Durant son transit, l'eau de l'aquifère chargée de minéraux dissous, se trouve en contact avec des complexes échangeurs de cations. Ceux-ci sont des aluminosilicates formés de couches ou feuillets, dont la cohésion est assurée par l'existence de cations et d'eau interfoliaires. La surface des feuillets est chargée négativement, favorisant ainsi la possibilité d'échange de cations avec ceux de la solution du sol. Cet indice d'échange est exprimé par l'équation:

$$\mathbf{\text{Log}(\text{Ca} + \text{Mg}) - 2 \text{Log Na}}$$

### ***II.2.3. Indice de saturation***

Il est exprimé par l'équation:

$$\mathbf{\text{SI} = \text{Log}(\text{IAP}/\text{Ks})}$$

C'est le rapport de l'activité ionique IAP au produit de solubilité à une température donnée. Cet indice indique les tendances des phases à se dissoudre ou précipiter, et permet de suivre l'évolution géochimique de l'eau dans l'aquifère, en traduisant les différents processus réactionnels, dont le siège est l'interaction de l'eau avec les matériaux aquifères. Quand il est positif (SI), il signifie que la solution est saturée ou sursaturée à l'égard du minéral qui a tendance à la précipitation. Par contre, quand (SI) est négatif, la solution est sous-saturée vis à vis du minéral qui a tendance à la dissolution.



# **Chapitre III : Matériels et méthodes**

## **I. Echantillonnage et méthodologie analytique**

Dans le domaine de la gestion des ressources en eau, pour assurer un développement durable, définir une zone de protection, ou effectuer un bilan hydrologique, il est utile de faire certain nombre d'analyses physicochimiques et isotopiques pour caractériser les eaux de la zone, déterminer par exemple la vulnérabilité de l'aquifère à la recharge et de localiser les zones d'alimentation.

Pendant notre stage et pour atteindre les objectifs fixés de ce travail on a eu recours à utiliser plusieurs méthodes d'analyses des éléments chimiques dans les eaux ainsi que la composition isotopiques (isotopes stables et Tritium). Pour les analyses chimiques on a utilisé la volumétrie et la chromatographie ionique. Pour les isotopes stables ils ont été analysés par la spectrométrie de masse, en fin on a opté pour la scintillation liquide pour le dosage du tritium.

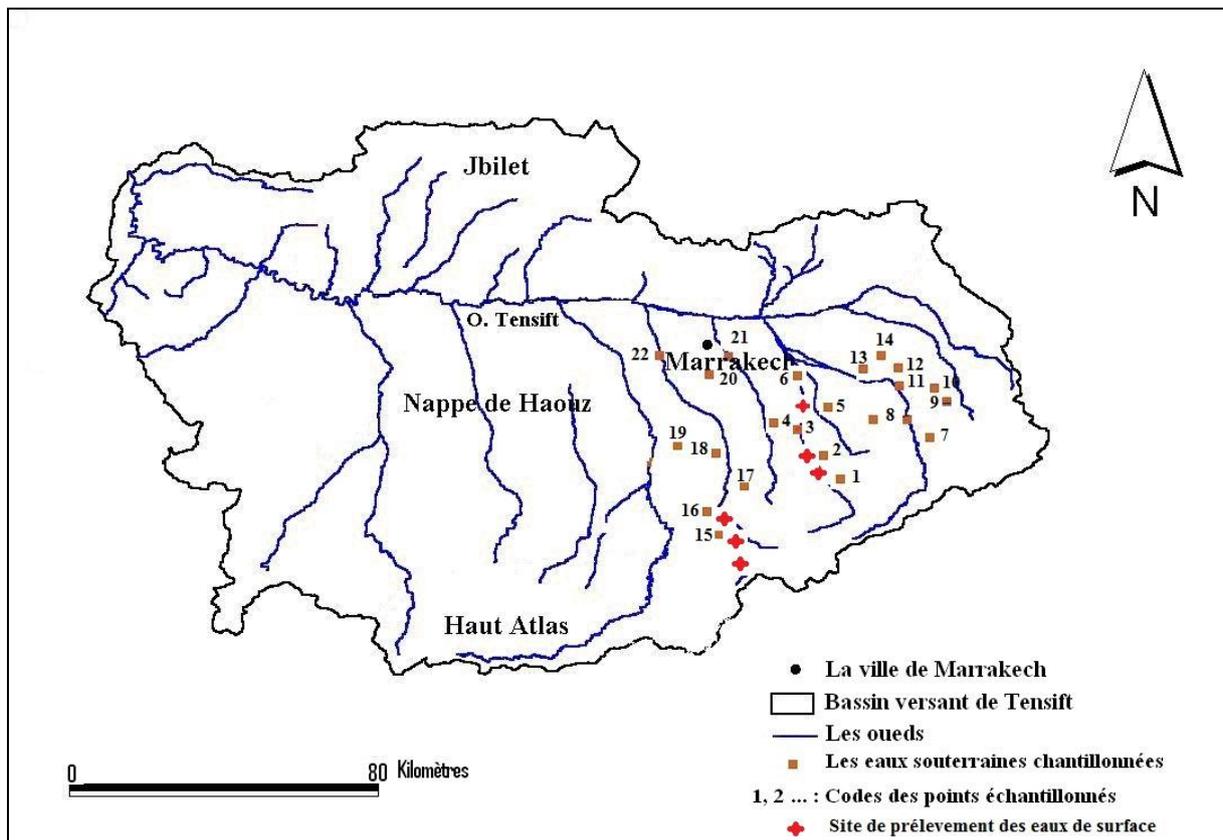
### **I.1. Echantillonnage**

L'étude de l'origine de la minéralisation des eaux, leurs modes et altitudes de recharge dans les trois bassins Rhéraya, Ourika et Zat sont les objectifs fixés de cette partie. Pour atteindre ces objectifs nous avons eu recours aux techniques hydro-chimiques et isotopiques.

Deux campagnes d'échantillonnage ont été effectuées en 2003 et 2004, au cours desquelles 159 échantillons (eaux souterraines et eaux de surface) ont été prélevés dans les trois bassins étudiés (Rhéraya, Ourika et Zat), 50 échantillons ont fait l'objet d'analyses chimiques, et 109 échantillons ont été analysés pour les isotopes stables (oxygène-18 et deutérium). Les différentes analyses ont été effectuées au laboratoire d'analyses physico-chimiques et au laboratoire des analyses isotopiques au sein de l'unité Eau et Climat au CNESTEN.

**NB :** les points d'eau qui ont été prélevés au niveau du bassin de Zat ont fait l'objet en plus des analyses chimiques et des isotopes stables des analyses des isotopes radioactifs (Tritium).

Les points de prélèvement ont été ainsi choisis de manière à recouvrir les bassins de l'amont vers l'aval (Figure25).



**Figure 25 :** Localisation des points échantillonnés dans la zone d'étude

**Tableau 5 :** localisation des points échantillonnés dans la zone d'étude avec leurs noms

<u>Rhéraya</u>		<u>Ourika</u>		<u>Zat</u>	
Sidi Boudhaj	<b>15</b>	Azrabzou	<b>1</b>	Ait Abdalah	<b>7</b>
Ain Krinous	<b>16</b>	T'nin Ourika (1)	<b>2</b>	Ait Barka	<b>8</b>
Centre Asni	<b>17</b>	T'nin Ourika (2)	<b>3</b>	Twama Centre	<b>9</b>
My Brahim	<b>18</b>	Jmaa de Ghmat	<b>4</b>	Iguir Bas	<b>10</b>
Tamadourt	<b>19</b>	Douar Ibriza	<b>5</b>	Ait Toumi	<b>11</b>
Ouanardid	<b>20</b>			Irrhissan	<b>12</b>
Al Bahia 1	<b>12</b>	Tougana	<b>6</b>	Tazert centre	<b>13</b>
Al Bahia 2	<b>22</b>			Ouariouza	<b>14</b>

L'échantillonnage des eaux est effectué d'une manière manuelle selon les consignes suivantes :

1. Pompage de l'eau stagnante dans l'ouvrage afin d'obtenir des eaux représentatives de l'aquifère à étudier ;
2. Mesure des paramètres physico-chimiques non conservés, qui sont pour la plupart indispensables à l'interprétation des données isotopiques (température, pH, conductivité électrique, alcalinité) ;
3. Rinçage de l'ensemble des flacons par les eaux à échantillonner ;
4. Prélèvement d'un litre d'eau dans des flacons en polyéthylène pour la mesure des éléments chimiques majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) ;
5. Prélèvement de 30 ml d'eau dans des flacons en polyéthylène à double bouchons pour les analyses en oxygène-18 et en deutérium ;
6. Prélèvement d'un litre d'eau dans des flacons en polyéthylène à double bouchons pour les analyses en tritium.

## **I.2. Analyses physico-chimiques de l'eau**

### ***I.2.1 Mesure du pH, conductivité et alcalinité sur le terrain***

Sur le terrain le pH, la conductivité sont mesurés à l'aide d'un pH mètre et un conductimètre portatifs étalonnés. En plus l'alcalinité est également mesurée in-situ. Une fois au laboratoire ces mesures sont refaites afin de corriger les erreurs éventuelles de mesures sur terrain.

### ***I.2.2. Analyses chimiques des eaux***

Les échantillons (eaux souterraines et eaux de surfaces) ont fait l'objet des analyses des éléments qui sont choisis en fonction de l'objectif ciblé. Pour la plupart des eaux on a mesuré les ions appelés couramment les majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ).

#### **I.2.2.1. Dosage volumétrique au laboratoire**

L'alcalinité, les chlorures, la dureté totale et la dureté calcique ont été titrés par dosage volumétrique au laboratoire d'analyses physico-chimiques à l'unité eau et climat au CNESTEN. Les concentrations sont exprimées en mg/l.

##### **1. Détermination de l'alcalinité**

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence des bicarbonates, carbonate et hydroxydes.

- le titre alcalimétrique exprime la teneur en ions hydroxydes  $\text{OH}^-$  et la moitié des ions carbonate  $\text{CO}_3^{2-}$
- le titre alcalimétrique complet exprime la teneur totale de l'eau en ions hydroxyde, carbonate et bicarbonate  $\text{HCO}_3^-$

La détermination des volumes successifs de la solution d'acide fort nécessaire à neutraliser : en premier lieu les ions hydroxyde et les ions carbonates en présence de la phénolphthaléine. En second, les ions bicarbonates en présence du vert de bromocrésol-rouge de méthyle.

**a. Réactifs**

- solution d'acide chlorhydrique HCL N/10
- solution étalon (20 méq / l CaCO<sub>3</sub>) (1000 mg/l CaCO<sub>3</sub>)
- solution alcoolique de phénolphthaléine
- solution du vert de bromocrésol-rouge de méthyle.

**i. Dosage du T.A (titre alcalimétrique)**

Ajouter une à deux gouttes de solution de phénolphthaléine à la prise d'essai fixée à 100 ml. Deux cas peuvent se présenter :

- Si une coloration rose se développe, l'eau est alcaline.

Verser lentement la solution d'HCL en agitant constamment jusqu'à décoloration de la solution. Noter le volume de la tombée de burette V1 en ml.

- Si la coloration ne se développe pas, l'eau est acide (TA=0 le cas des eaux naturelle à pH < 8.3) passer au dosage du TAC.

Les échantillons concernés dans la présente étude ont généralement un pH inférieur à 8, quelque soit les eaux de surface ou souterraine, donc on procède directement au dosage alcalimétrique total (TAC).

**ii. Dosage du T.A.C (titre alcalimétrique complet)**

Ajouter une à deux gouttes de bromocrésol-rouge de méthyle à la prise d'essai traitée précédemment (coloration bleu vert)

- Continuer le dosage par la solution d'HCL – sans ajuster le volume de la burette jusqu'au virage au jaune orangé
- Noter le volume V2 de la tombée de burette.

**b. Expression des résultats**

$$\text{T.A} = V_{tb} * 61 \text{ (mg/l)}$$

$$\text{T.A.C} = V_{tb} * 61 \text{ (mg/l)}$$

V<sub>tb</sub> : le volume de la tombée de burette

## 2. Détermination de la dureté calcique (TCA)

La dureté calcique d'une eau est la concentration en ions calcium dans cette eau. Le titrage des ions calcium se fait avec une solution de sel disodique de l'acide Ethylènediamine Tetraacétique (EDTA) en milieu tamponné. L'acide Calcione Carboxylique (HSN) est utilisé comme indicateur.

### a. Réactifs

- Solution de l'EDTA 0,02M
- Solution Tampon (Hydroxyde de Sodium 2M)
- Indicateur Calcione Carboxylique (HSN)
- Solution Etalon de Carbonate de Calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) 4000 mg  $\text{Ca}^{2+}$  /l.

### b. Le dosage

Dans chaque prise d'essai ajouter (100 ml) :

- 5ml de Soude
- Une pincée Calcione Carboxylique (coloration rouge)
- Titrer par la solution complexométrique EDTA jusqu'au virage au bleu.

### c. Expression des résultats

$$C (\text{Ca}^{2+}) = V_{\text{tb}} \cdot f \cdot 0,4 \text{ méq/l}$$

$$C (\text{Ca}^{2+}) = V_{\text{tb}} \cdot f \cdot 8 \text{ (mg/l)}$$

$V_{\text{tb}}$  : Volume de la tombée de burette

f : facteur de dilution

## 3. Détermination de la dureté totale

La dureté totale d'une eau est la concentration totale en ions calcium, magnésium dans une eau. Le titrage des ions calcium et magnésium se fait avec une solution de sel disodique de l'acide Ethylènediamine Tetraacétique (EDTA) en milieu tamponné.

Le noir d'Eriochromme T est utilisé comme indicateur.

### a. Réactifs

- Solution de L'EDTA 0.02 M
- Solution tampon
- Indicateur noir Erichrome T
- Solution Etalon de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) 200 méq/l.

### b. le dosage

Dans chaque prise d'essai qui est fixée à 100 ml ajouter :

- 5 ml de solution tampon
- Une pincée d'Erichrome T
- Titrer par la solution complexométrique EDTA jusqu'au virage au bleu.

**c. Expression de résultats**

$$C (\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}) \text{ méq/l} = V_{tb} * 0,4$$

A partir des résultats obtenus, on peut tirer la concentration en  $\text{Mg}^{2+}$ . Il faut soustraire la concentration en  $\text{Ca}^{2+}$  déjà déterminée avec le dosage de la dureté calcique (TCa), de la dureté totale.

$$C (\text{Mg}^{2+}) \text{ méq/l} = C (\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}) \text{ méq/l} - C (\text{Ca}^{2+}) \text{ méq/l}$$

**4. Dosage des chlorures**

Dosage des chlorures en milieu acide par le nitrate mercurique en présence de la diphenylcarbazone comme indicateur.

**a. Réactifs**

- solution alcoolique de bleu de bromophénol et diphenylcarbazone
- solution d'acide nitrique N/3
- solution titrée de nitrate mercurique ( $\text{Hg} (\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) N/10
- solution étalon de chlorure de sodium.

**b. Mode opératoire**

Le volume de la prise d'essai est fixé à 100 ml, on procède à la dilution si nécessaire. On ajoute dans l'Erlenmeyer de chaque prise d'essai :

- 8 gouttes de Diphenylcarbazone
- Acide Nitrique N/3 en excès (pH = 3.6 couleur jaune foncé)
- Titrer lentement par la solution du nitrate mercurique tout en agitant
- Arrêter le titrage à la première goutte qui donne le virage (couleur violet).

**c. Expression des résultats**

$$C (\text{Cl}^-) = V_{tb} * 35,5 * f \text{ mg/l}$$

**V<sub>tb</sub>**: Volume de la tombée de burette

**F** : facteur de dilution

### 1.2.3. Dosage des ions majeurs par chromatographie ionique

Les ions majeurs sont analysés par la chromatographie ionique (DIONEX) dont le principe est basé sur un échange d'ions sur une résine. Cette dernière peut être chargée soit positivement (pour séparer les anions) soit négativement (pour séparer les cations). Les concentrations sont exprimées en mg/l.

Un éluant préparé à base des carbonates et des bicarbonates de sodium en cas d'analyse des anions, ou d'acide méthanosulfonique (HMSA) en cas d'analyse des cations est nécessaire pour entraîner les ions de l'échantillon en fonction de leur taille et de leur polarisabilité, par une phase dite mobile, et les séparés afin de les fixer sur la résine d'une colonne où sont installés des sites échangeurs d'anions ou de cations par la phase dite stationnaire.

La séparation se fera plus ou moins facilement selon que l'interaction électrostatique entre la résine de la colonne et les ions à séparer est plus ou moins forte. Le temps de rétention diffère pour chacun des espèces ioniques ce qui permet de les identifier et de les dosés à l'aide d'un détecteur conductivimétrique.

L'identification de l'espèce ionique est assurée par la comparaison des temps de rétention des différents pics observés avec ceux de standards ; la hauteur ou la surface des pics permet une détermination quantitative.

a) Schéma général d'un chromatographe ionique

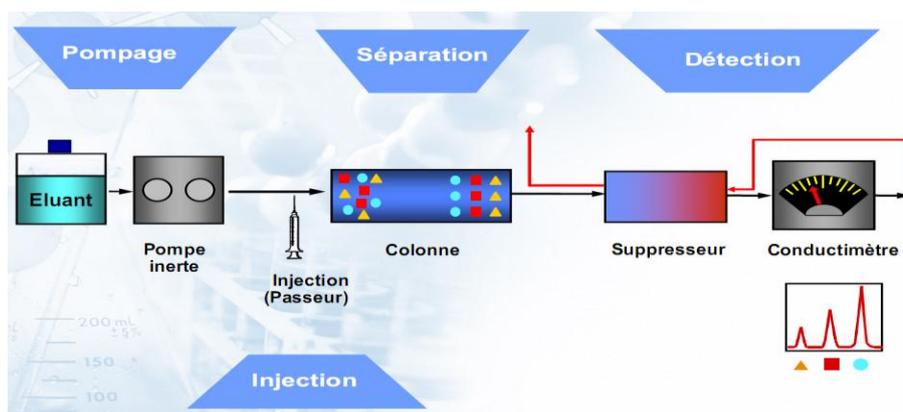


Figure 26: Schéma général d'un chromatographe ionique.

L'appareillage de chromatographie DIONEX IC-120 comprend :

- ✓ Une pompe
- ✓ Un système d'injection, (boucle de 25µl)
- ✓ Une pré-colonne ou colonne de garde
- ✓ Une colonne de séparation analytique

- ✓ Un suppresseur compensateur de conductivité
- ✓ Un détecteur conductimétrique
- ✓ Un système d'acquisition et de contrôle de l'instrument piloté par le logiciel Chromelon version 6.8
- ✓ Un échantillonneur automatique DIONEX AS 40

*b) Analyse des anions*

Après avoir conditionné le système chromatographique (signal de conductivité : 16  $\mu\text{s}/\text{cm}$  et une pression : 1600 PSI), on procède à la préparation d'une gamme de solutions étalons certifiés, de composition anionique mixte avec des concentrations différentes (F ; Cl ;  $\text{NO}_2$ ;  $\text{NO}_3$ ; Br;  $\text{PO}_4$  ;  $\text{SO}_4$ ).

Les étalons sont placés dans l'échantillonneur automatique en premier temps suivit des échantillons. Les résultats sont obtenus du micro-ordinateur à l'aide du logiciel Chromeleon, sont exprimés en mg/l. L'aire obtenue des étalons est comparée à celle des échantillons pour en calculer la concentration à l'aide d'une courbe linéaire. Au besoin, réintégrer les données en suivant le programme du logiciel et multiplier par le facteur de dilution.

*c) Analyse des cations*

Le conditionnement du système dans ce cas, consiste à fixer le signal de conductivité à (2  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) et une pression (1600 PSI). La gamme de solutions étalons utilisée est de composition cationique mixte (Li ; Na ;  $\text{NH}_4$  ; K ; Mg ; Ca). Les résultats obtenus sont calculés et exprimés de la même façon qu'en cas des anions.

### **I.3. Analyses des isotopes stables (Oxygène-18, Deutérium)**

Au laboratoire des analyses des isotopes stable à l'unité eau et climat, 109 échantillons ont été analysés par spectromètre de masse selon une méthode d'équilibration avec le dioxyde de carbone ou l'hydrogène selon le gaz qu'on veut mesurer. Les teneurs sont exprimées en  $\delta$  ‰ Vs V-SMOW.

3 ml d'échantillons d'eau sont mis en équilibre isotopique dans un système d'équilibre avec le dioxyde de carbone ou l'hydrogène selon le gaz qu'on veut mesurer avec la platine qui joue le rôle de catalyseur à une pression de l'ordre de 500 mbar et à une température de 18°C. Les teneurs en oxygène-18 et en Deutérium reflètent alors celles de l'eau mesurée par le spectromètre de masse. C'est l'appareil de mesure des isotopes stables dans la molécule d'eau et dans les carbonates. Le spectromètre de masse est conçu spécialement pour la

détermination, en quelques secondes de très petites variations d'abondance isotopique, entre un gaz à analyser et d'un gaz servant d'étalon de référence (le spectromètre de masse autorise une détection meilleur que  $10^{-6}$ ).

L'appareillage est composé d'un spectromètre de masse et du système d'équilibration. Le spectromètre de masse est constitué de quatre parties :

- ❖ **Une source d'ions** : dans laquelle se produit, l'ionisation des molécules, mais aussi la décomposition des ions, de l'échantillon à analyser en phase gazeuse
- ❖ **Un analyseur** : qui permet de trier les ions en fonction de leur rapport masse/charge ( $m/z$ ),
- ❖ **Un détecteur** : qui compte les ions en leur associant leur rapport  $m/z$ ,
- ❖ **Un enregistreur** : pour le traitement du signal et la visualisation des spectres.

Le système d'équilibration est composé de trois bancs de huit positions d'où la possibilité d'analyser 24 échantillons dont six sont des standards internes du laboratoire et un bain marie à  $18^{\circ}\text{C}$  contenant suffisamment d'eau pour que la partie inférieure des flacons contenant les 3 ml d'eau soit immergée et mis en agitation à 80 tr/mm.

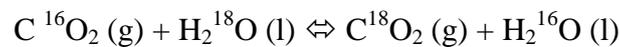
Les isotopes d'un même élément, qui diffèrent par leurs masses ont qualitativement les mêmes propriétés chimiques mais la vitesse des réactions physiques ou chimiques auxquelles ils participent dépend de l'isotope présent dans les molécules qui interagissent. C'est de cette différence de masse entre les différents isotopes qu'est né le principe de la méthode de mesure de leurs abondances.

Des ions de masses différentes (par ce qu'ils contiennent des isotopes différents), accélérés dans un champ électromagnétique, subissent une déflexion en relation avec la masse de l'ion accéléré. Les isotopes sont ainsi séparés et il suffit de collecter les divers faisceaux d'ions (correspondants aux différents isotopes) pour mesurer la proportion de chaque isotope.

#### *a) Analyse de l'oxygène-18*

La mesure absolue des abondances en isotopes lourds est compliquée. Dans la pratique, on compare la composition isotopique de l'échantillon à celle d'un standard par spectrométrie de masse. Pour l'oxygène-18, comme il est impossible d'introduire directement dans un spectromètre de masse de l'eau liquide, on procède préalablement à un échange isotopique entre l'échantillon d'eau à analyser et du gaz carbonique dont on connaît par ailleurs la

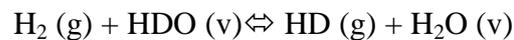
composition isotopique. Le principe de la préparation consiste à mettre en présence dans une enceinte thermostatée l'eau à analyser et le gaz de référence. On a alors la réaction suivante:



Après équilibration entre le CO<sub>2</sub> gazeux et l'eau de l'échantillon on mesure ensuite la teneur en oxygène-18, la composition isotopique de ce gaz est modifiée. L'analyse du CO<sub>2</sub> permet de remonter à la composition initiale de l'échantillon.

#### b) *Analyse du Deutérium 2H*

Le principe de l'analyse du deutérium est semblable à celui de l'oxygène-18. Dans ce cas, le gaz d'équilibre est l'hydrogène, la réaction est donc la suivante :



Evaporation puis réduction de (7ml) d'eau dans un four à Uranium (800 °C), l'hydrogène récupéré est analysé au spectromètre de masse. L'analyse du gaz permet ainsi de remonter à la composition initiale de l'échantillon.

### **I.4. Analyses des isotopes radioactifs**

Les neuf échantillons du bassin de Zat ont fait l'objet d'analyses des teneurs en tritium par enrichissement électrolytique au laboratoire d'analyses du tritium à l'unité eaux et climat (UEC), alors que le contage est effectué par scintillation liquide à l'unité de radioécologie, et datation (URED) au CNESTEN. Les teneurs sont exprimées en UT.

Le domaine d'application du Tritium est très large, s'étend de la détermination des zones d'alimentation, au calcul de la recharge, passant par la détermination du temps moyen de séjour, ou encore la surveillance de l'exploitation d'un aquifère.

La datation des eaux dans un système aquifère est l'application la plus courante, du fait qu'elle permet la connaissance du temps de séjour de l'eau d'un aquifère. La période de demi-vie du Tritium (12,37 ans) limite son usage aux eaux qui ont été rechargées au moins en partie durant les dernières décennies.

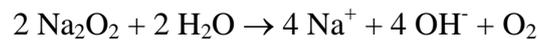
La mesure par spectrométrie à scintillation liquide (SSL) est la méthode utilisée au laboratoire d'analyse du Tritium au CNESTEN pour mesurer la teneur en tritium. La technique est dite d'enrichissement électrolytique du tritium. Les échantillons passent par trois étapes d'analyses :

- Distillation
- Electrolyse
- Neutralisation

Tous les échantillons doivent être distillés d'abord afin d'éviter tous les sels pouvant causer la corrosion des électrodes. Ensuite il faut procéder à un enrichissement électrolytique pour augmenter la concentration en atome lourd  $^3\text{H}$  et éliminer les atomes légers ( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^{16}\text{O}$ ), du fait que les eaux contiennent généralement des faibles concentrations en tritium.

A l'étape de l'hydrolyse et pour s'assurer de l'élimination totale des traces de liquides organiques qui peuvent être présentes dans les échantillons, une addition du Peroxyde de Sodium ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) est nécessaire.

Le  $\text{Na}_2\text{O}_2$  réagit avec de l'eau selon l'équation suivante:



L'eau enrichie restante est récupérée dans des ballons de 100ml puis neutralisée avec du chlorure de plomb  $\text{PbCl}_2$ . Le rôle de la neutralisation est d'éliminer l'hydroxyde de sodium restant avec l'échantillon, et de réduire le pH pour faciliter le comptage par scintillation liquide

# **Chapitre IV : Résultats et discussions**

## II. Résultats et discussion

### II.1. Caractérisation chimique et isotopique des eaux du bassin de Rhéraya

#### II.1.1. Caractérisation physique des eaux

##### II.1.1.1. Les eaux de surface

La conductivité électrique traduit le degré de minéralisation d'une eau. Au niveau des eaux de l'oued la conductivité présente une grande variation de l'amont vers l'aval du bassin. Sur vingt échantillons de l'eau de l'oued prélevés au niveau trois stations : Armed, Asni et Tahanout à des périodes différentes de l'année. La conductivité électrique varie de 84,4  $\mu\text{s/cm}$  à Armed et 1632  $\mu\text{s/cm}$  à Tahanout, avec une moyenne de 392,5  $\mu\text{s/cm}$ .

##### II.1.1.2. Les eaux souterraines

Les mesures effectuées sur des échantillons d'eau souterraines repartis le long du bassin, montre que la conductivité électrique augmente de l'amont vers l'aval du bassin (dans le sens d'écoulement des eaux souterraines). Elle oscille entre 106  $\mu\text{s/cm}$  au niveau de la source d'Ain Krinous et 1715  $\mu\text{s/cm}$  au forage de Moulay Brahim, avec une moyenne de 654  $\mu\text{s/cm}$ . Par ailleurs, le pH des eaux montre également une évolution de l'amont vers l'aval du bassin. Les valeurs de pH sont généralement comprises entre 8,06 et 7,60.

#### II.1.2. Caractérisation hydro-chimique des eaux

L'analyse des résultats chimique des eaux du bassin de Rhéraya (eaux de surface et eaux souterraines) montre l'existence d'importantes variations de l'amont vers l'aval du bassin.

##### II.1.2.1. Les eaux de surface

D'après les échantillons prélevés sur l'oued Rhéraya, trois points d'eau (Armed, à Asni et à Tahanout) ont fait l'objet des analyses complètes de tous les éléments majeurs. Le tableau suivant résume les résultats obtenus.

**Tableau 6:** Résultats des analyses chimiques des eaux de l'Oued Rhéraya

Nom des échantillons	CE ( $\mu\text{s/cm}$ )	Altitude	T°C	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	Ca <sup>++</sup> (mg/l)	Mg <sup>++</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	BI en %
Armed	136,2	2054	9,4	7,92	72,59	2,08	10,92	4,52	21,32	2,52	2,42	0,38	-5
Asni	1076	1101	16,1	8,02	192,15	216,55	18,94	54	45,29	15,07	144,44	2,65	-4
Tahanaout	1168	985	18	7,76	222,04	236,08	19,11	52,49	46,49	20,42	157,96	2,49	-3

Les concentrations en éléments majeurs montrent une évolution de la minéralisation depuis le point de prélèvement à Armed située à une altitude de 2054 m vers les le point à Tahanout situé à 985 m en passant par le point à Asni qui est à une altitude de 1101m. En amont (Armed) les eaux sont généralement diluées et présentent une faible minéralisation

surtout en chlorures, en sulfatés et en nitrates. Au fur et à mesure qu'on se dirige vers l'aval du bassin, les concentrations augmentent, cela est bien marqué pour les éléments suivant :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$ .

Le  $\text{Na}^+$  et le  $\text{Cl}^-$  sont présentés une variation importante dans les eaux de l'oued. Les concentrations passent rapidement des valeurs faibles (< 2,5 mg/l) à la station d'Armed en amont vers des valeurs plus élevées en aval du bassin (160 mg/l pour le  $\text{Na}^+$  et 236 mg/l pour le  $\text{Cl}^-$ ). Cette variation concorde bien avec celle de la conductivité. Les teneurs élevées peuvent être expliquées par la circulation des eaux sur des formations évaporitiques salifères du Trias qui est abondant dans la région.

On note également la même évolution des concentrations en  $\text{Ca}^{2+}$  et le  $\text{SO}_4^{2-}$ . Ces deux éléments ont une provenance commune dans la plupart du temps. Dans les eaux de l'oued les teneurs en ces éléments augmentent ainsi en allant de l'amont vers l'aval, passent des concentrations minimales (< 21 mg/l pour le  $\text{Ca}^{2+}$ ) et (<5 mg/l pour le  $\text{SO}_4^{2-}$ ) vers des concentrations qui dépassent 45 mg/l pour le  $\text{Ca}^{2+}$  et 54 mg/l pour le  $\text{SO}_4^{2-}$ . Ce qui peut être expliqué par la dissolution du gypse d'origine ( $\text{CaSO}_4$ ).

Des concentrations relativement élevées en nitrates  $\text{NO}_3^-$  sont remarquées dans les eaux de l'oued surtout en zone aval, cette augmentation permet de distinguer des pollutions d'origine anthropique tel que le retour des eaux d'irrigation vers l'oued, et les rejets domestiques.

### **II.1.2.2. Les eaux souterraines**

- *Etude statistique des résultats dans le bassin de Rhéraya*

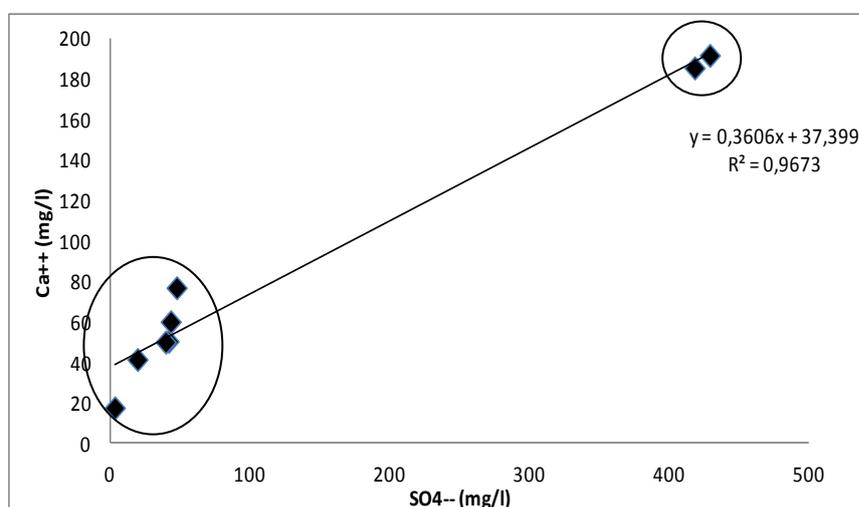
Devant le nombre des paramètres étudiés et à fin de bien cerner les relations qui lient ces différents paramètres entre eux, et de préciser les phénomènes à l'origine de ces relations, on a effectué l'analyse multidimensionnelle (analyse en composantes principales).

C'est une méthode descriptive, elle permet de quantifier. On a réalisé l'ACP sur l'ensemble des eaux échantillonnées au niveau du bassin de Rhéraya. On a utilisé comme variables les mesures physiques (température, pH, conductivité électrique), les éléments chimiques ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) ainsi que l'altitude. On note que les balances ioniques de ces résultats varient de 1% à 7% à l'exception de deux échantillons dont les balances ioniques sont de -14% et +12%.

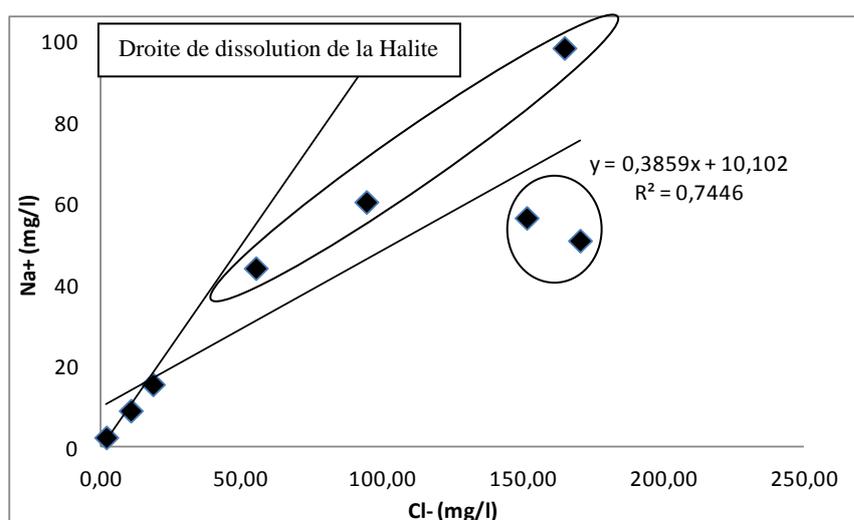
**Tableau 7:** Tableau des corrélations entre les variables étudiées pour les eaux souterraines du bassin Rhéraya.

	CE	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
CE	1									
pH	<b>-0,760</b>	1								
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,075	-0,430	1							
Cl <sup>-</sup>	0,485	<b>-0,710</b>	0,047	1						
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,915</b>	-0,501	-0,130	0,265	1					
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>0,827</b>	-0,462	-0,042	-0,018	<b>0,800</b>	1				
Ca <sup>++</sup>	<b>0,883</b>	-0,577	0,070	0,108	<b>0,805</b>	<b>0,984</b>	1			
Mg <sup>++</sup>	<b>0,880</b>	-0,634	0,114	0,131	<b>0,777</b>	<b>0,975</b>	<b>0,993</b>	1		
Na <sup>+</sup>	0,669	<b>-0,843</b>	0,283	<b>0,863</b>	0,452	0,252	0,400	0,408	1	
K <sup>+</sup>	<b>0,888</b>	-0,528	0,035	0,054	<b>0,899</b>	<b>0,964</b>	<b>0,966</b>	<b>0,950</b>	0,372	1

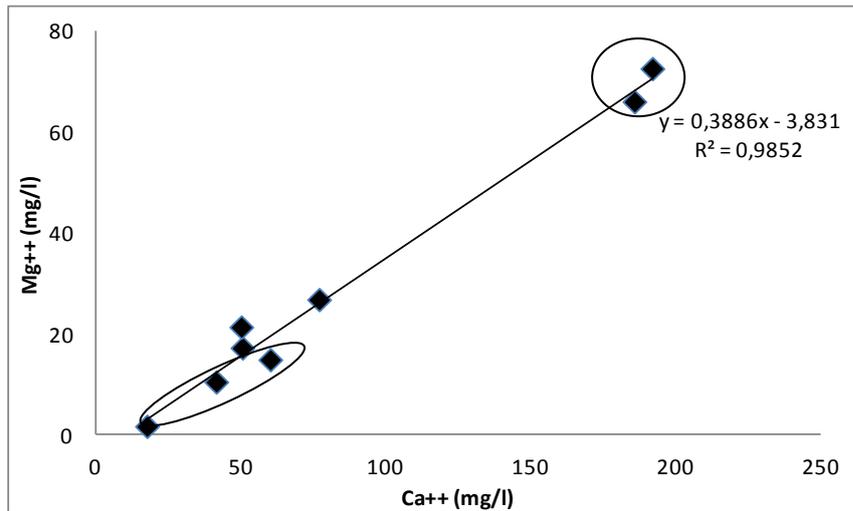
Le tableau illustre les différentes corrélations qui se présentent entre les variables étudiées, les plus significatives sont : Cl<sup>-</sup> / Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> / Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> / Ca<sup>2+</sup>.



**Figure 27 :** Corrélations entre Ca<sup>2+</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> des eaux souterraines du bassin Rhéraya



**Figure 28 :** Corrélations entre Cl<sup>-</sup> et Na<sup>+</sup> des eaux souterraines du bassin Rhéraya



**Figure 29 :** *Corrélations entre  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  des eaux souterraines du bassin Rhéraya*

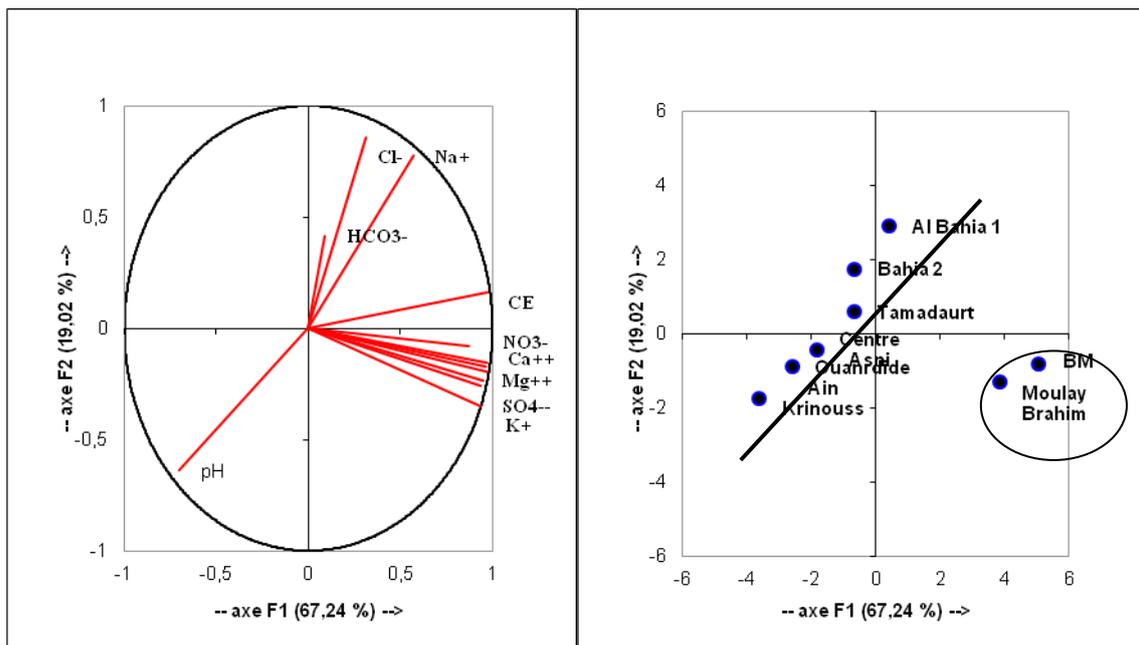
La bonne corrélation entre  $Ca^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$  souligne fortement le lien entre ces deux éléments (Figure 27). On constate que la majorité des points sont situés sur la droite de corrélation, ce qui confirme qu'ils proviennent principalement du lessivage des formations gypsifères. Une individualisation est bien marquée pour les deux points correspondant à la zone de Moulay Brahim (Source et forage) située à une altitude de 1221 m, où les concentrations atteignent des valeurs maximales plus que 400 mg/l pour le  $SO_4^{2-}$  et plus de 180 mg/l pour le  $Ca^{2+}$ , ceci peut être expliqué par la rencontre des eaux avec des formations gypsifères ( $CaSO_4$ ).

La corrélation positive entre les concentrations de  $Cl^-$  et  $Na^+$  illustre l'évolution des chlorures en fonction des sodiums (Figure 28). 3 Points prélevés en amont du bassin sont situés sur la droite de dissolution de l'Halite ce qui peut être expliqué par la circulation des eaux dans des formations évaporitiques salifères triasiques abondant dans la zone d'étude. Par ailleurs, trois points prélevés à une altitude plus basse (2 puits à El Bahia et un forage à Tamadaurt) se situent en dessus de la droite de corrélation en présentant un appauvrissement en  $Na^+$  par rapport au  $Cl^-$ , ceci illustre peut être un processus d'échange cationique de  $Ca^{2+}$  contre  $Na^+$  sur les argiles qui se trouvent généralement associées aux formations évaporitiques triasiques.

La bonne corrélation entre le calcium et le magnésium (Figure 29) indique que ces deux éléments proviennent de la même origine, sauf que pour les trois points précités on remarque une légère augmentation des teneurs en  $Ca^{2+}$  ce qui confirme le processus d'échange cationique entre le  $Na^+$  et  $Ca^{2+}$  sur les argiles.

Les nitrates sont présents en quantité moyenne considérable (50 mg/l). La valeur élevée en cet élément peut résulter généralement d'une contamination par le retour des eaux d'irrigation chargées en engrais.

En utilisant l'ACP on remarque que la dispersion des variables et des individus pour les points des eaux souterraines montre une évolution de la minéralisation principalement en éléments chlorures et sodium, depuis la source d'Ain Krinous située à une altitude de 2050m vers des points d'eau échantillonnées en basses altitudes (puits Al Bahia à 648m d'altitude).



**Figure 30 :** Espace des variables

**Figure 31 :** Espace des individus

### II.2.2.3. Facies chimiques des eaux du bassin Rhéraya

La détermination de l'hydrochimie des eaux de surfaces et souterraines du bassin de Rhéraya a été effectuée sur une dizaine d'échantillons. L'analyse des résultats chimique de ces eaux a montré l'existence d'importantes variations de l'amont vers l'aval du bassin.

Afin de mieux comprendre le chimisme des eaux, on a fait appel au diagramme de Piper pour visualiser la composition chimique des eaux.

Le procédé consiste à porter les concentrations sur deux triangles équilatéraux (triangle des anions et triangles des cations) puis projeter les points représentatifs des échantillons dans un diagramme sous forme de losange qui donne les facies chimiques des eaux.

La variation du facies chimique des eaux du bassin de Rhéraya (Figure 32) sur le diagramme de piper permet de distinguer un groupe de points comprenant à la fois les eaux de l'oued à Armed et les eaux souterraines échantillonnées à des altitudes différentes ce groupe

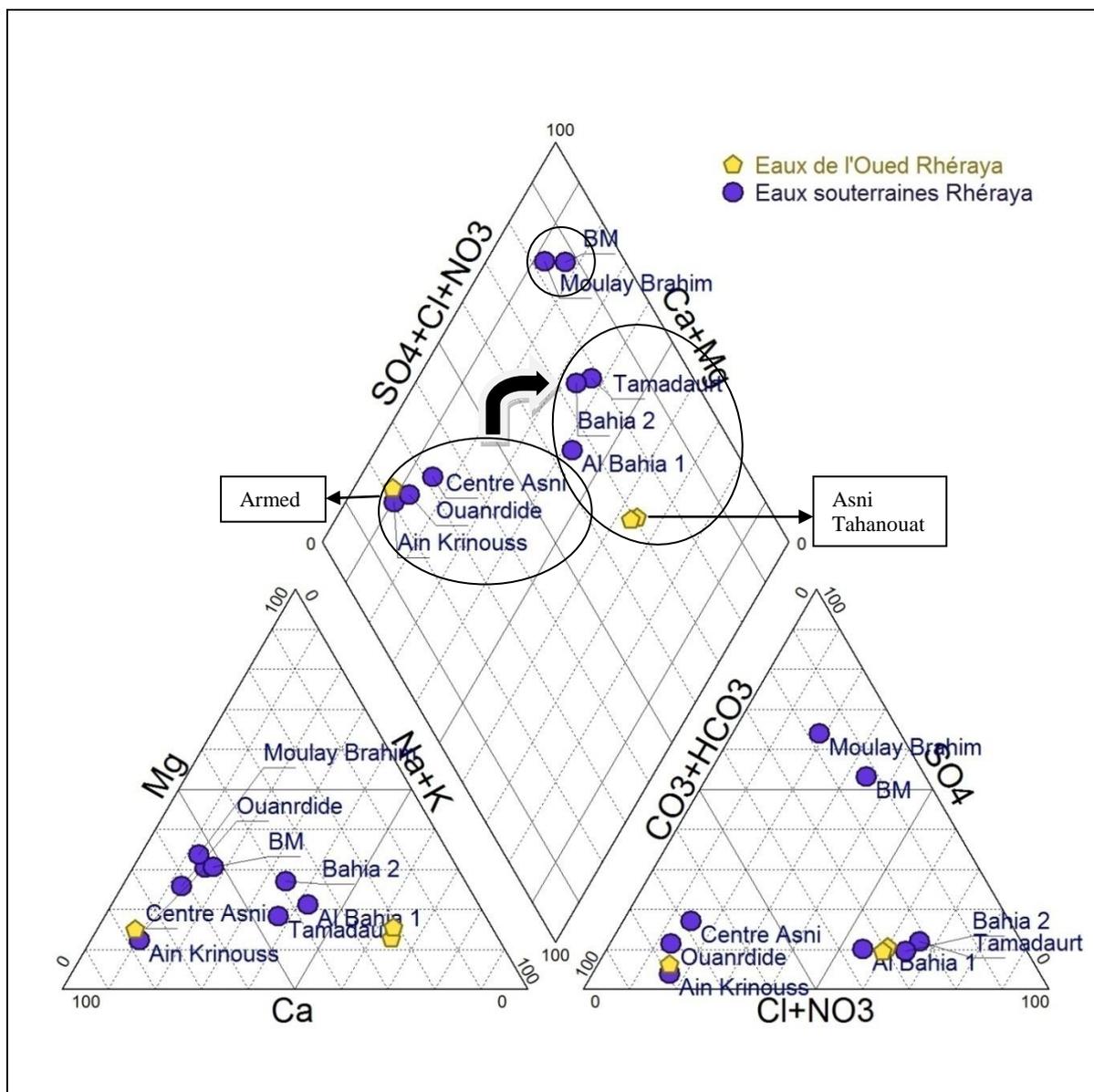
a un faciès bicarbonaté calcique et magnésien. Se sont des eaux relativement diluées et moins chargées, leur groupement ensemble sur un seul faciès peut refléter l'existence d'une relation entre eux.

Le faciès chimique des eaux migre vers le pôle chloruré et sulfaté calcique, marqué par des points d'eau souterraine situés à des basses altitudes, ce qui indique qu'elles ont traversé des formations évaporitiques gypsifères et salifères.

Les eaux de l'oued au point d'Asni et Tahanout présentent un faciès chimique différent, des deux groupes précédents qui est un faciès chloruré sodique, cela peut signifier que les eaux de l'oued ont acquis cette minéralisation en traversant des formations évaporitiques salifères.

Les deux points représentant les eaux souterraines à Moulay Brahim présentent un faciès hyper chloruré et sulfaté qui peut être le résultat d'une part d'un contact immédiat avec les évaporites, et d'autre part par le retour des eaux d'irrigation.

En effet, la zone amont du bassin située à des altitudes plus élevée couvre des terrains magmatiques du Précambrien qui consistent le socle du bassin, d'où la faible minéralisation des eaux qu'elles en circulent. Alors que vers l'aval (Asni et Tahanout), une importante couverture fait de formations détritiques de Trias se développe.



**Figure 32:** Présentation du facies chimique des eaux du bassin de Rhéraya.

### *II.1.3. Traçage des eaux souterraines du bassin de Rhéraya par le couple $^{18}\text{O}/^2\text{H}$*

L'étude chimique précédemment discutée a été focalisée principalement sur les questions de l'origine de la minéralisation et les principaux mécanismes responsables de la composition chimique de l'eau. Dans cette partie, on utilisera une autre approche isotopique, basée sur le traçage du milieu par les isotopes de la molécule d'eau.

Ces techniques de traçage naturel sont censées d'aborder les problèmes d'origine des eaux, leur vitesse d'écoulement et taux de renouvellement. La réponse à ces questions, constituerait une donnée capitale pour la conception d'une gestion prudente de la ressource hydrique dans la région et contribuerait à une meilleure définition des consignes de gestion intégrée, des eaux de surface et souterraines.

Dans cette partie on abordera l'interprétation des résultats isotopiques de 83 échantillons d'eau de l'oued et 8 échantillons d'eau souterraine, prélevés en deux campagnes (2003 et 2004) et répartis sur l'ensemble du bassin (Figure 25).

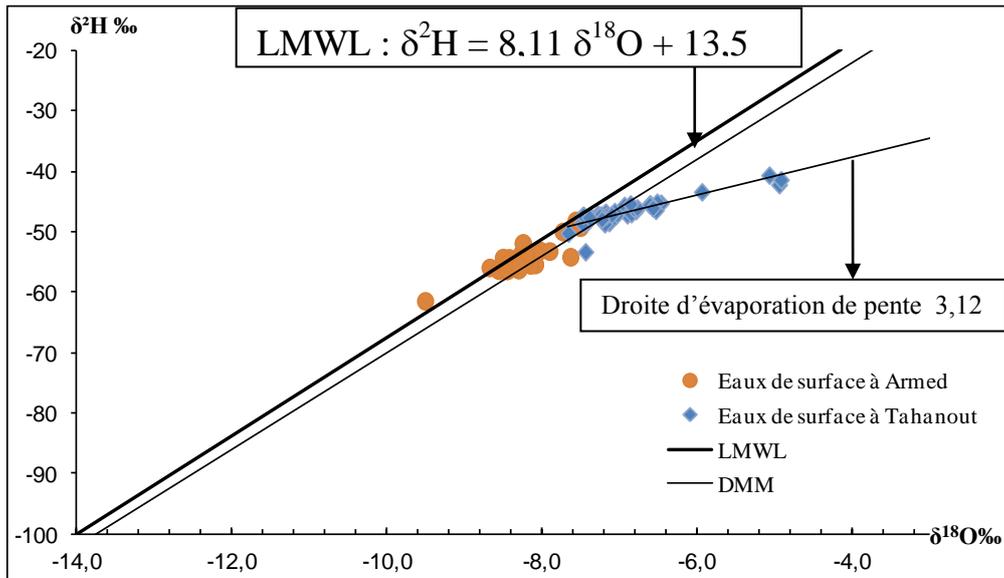
- Les eaux de surface

Les teneurs en  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$ , se répartissent grossièrement en deux groupes, le premier correspond à la station d'Armed située en amont du bassin avec des compositions appauvries, et l'autre en aval à la station de Tahanout de compositions plus enrichies.

En effet, le groupe de points échantillonnés au niveau de la station d'Armed sont les plus appauvries avec des valeurs de  $^{18}\text{O}$  comprises entre -7,51 et -9,51 ‰ vs SMOW, et des valeurs de  $^2\text{H}$  comprises entre -48,17 et -61,48 ‰ vs SMOW.

Le deuxième groupe de points prélevés de la station de Tahanout, présente des teneurs plus enrichies en oxygène-18, allant de 1,00 et -7,67 ‰ vs SMOW, et en deutérium, allant de -53,36 et -21,70 ‰ vs SMOW.

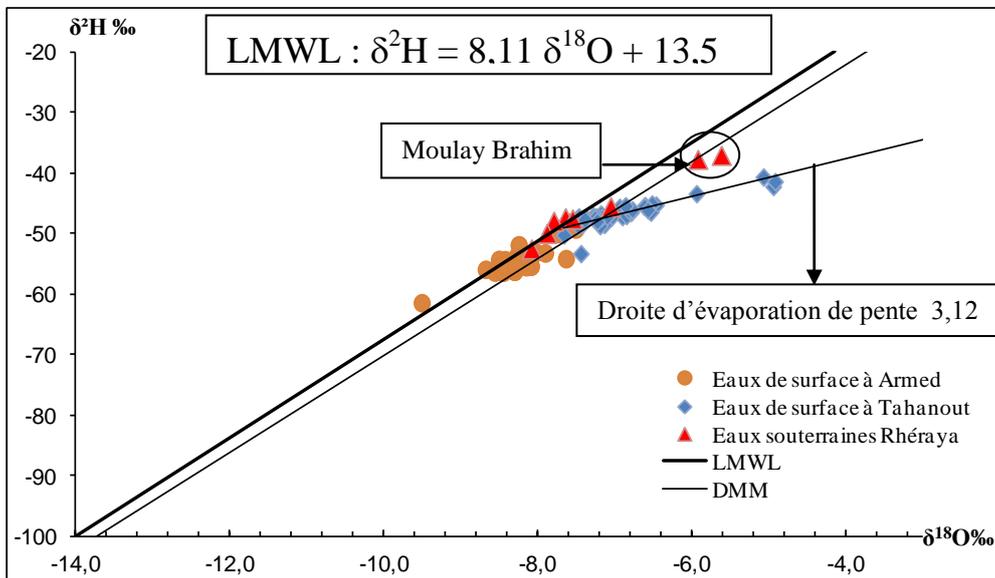
Dans le diagramme  $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$  (Figure 33), les points d'eau de l'oued Rhéraya à la station d'Armed sont situés pour la plupart sur la droite météorique locale (DML) (Raibi et al, 2004), cela montre que les eaux n'ont pas subies une évaporation lors de leur circulation. Par contre, les points d'eaux de l'oued à la station de Tahanout, sont situés en dessous de la droite météorique locale (DML) et s'alignent selon une droite d'évaporation de pente de 3,12. Ces points attestent d'un fractionnement isotopique dû à l'évaporation, expliquant ainsi l'enrichissement en  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$ .



**Figure 33 :** Relation oxygène-18 - Deutérium dans les eaux de l'oued Rhéraya.

- Les eaux souterraines

Les teneurs en isotopes stables des eaux souterraines varient entre -8,09 et -5,62 ‰ vs SMOW pour  $^{18}\text{O}$  et entre -52,58 et -37,10 ‰ vs SMOW pour  $^2\text{H}$ . La teneur isotopique moyenne des eaux souterraines est de -7,20 ‰ vs SMOW pour  $^{18}\text{O}$  et de -45,76 ‰ vs SMOW  $^2\text{H}$ .

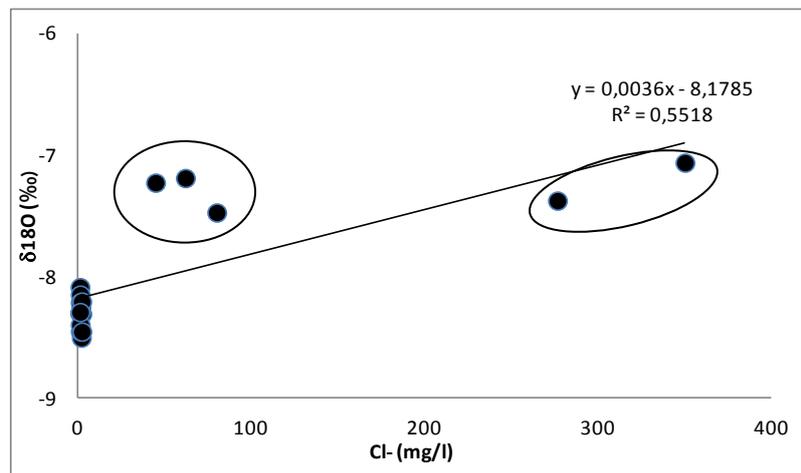


**Figure 34:** Relation oxygène-18 - Deutérium dans les eaux souterraines et de l'oued du bassin Rhéraya.

Les teneurs isotopiques ont été reportés sur le diagramme  $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$  (Figure 34). A l'exception des deux points (forage et source à Moulay Brahim) qui montrent une légère évaporation du fait qu'ils sont situés en dessous de la droite météorique local, mais s'alignent

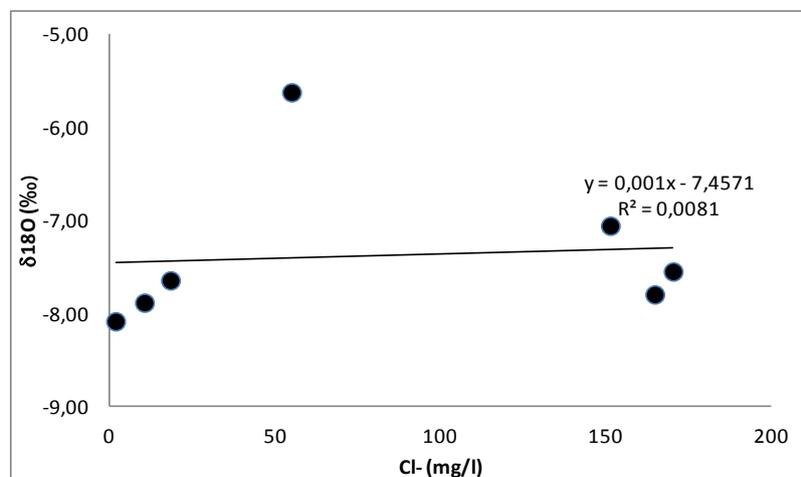
partiellement sur la droite météorique mondiale, donc, cette variation de signal isotopique peut être due à un changement de l'origine des masses d'air des eaux alimentant cette zone. La majorité des points s'alignent sur la droite météorique locale (DML), ce qui montre l'absence de tout phénomène d'évaporation et ce qui peut être expliqué par une infiltration rapide des eaux souterraines.

### II.1.3.1. Relation Oxygène 18-Cl-des eaux du bassin Rhéraya



**Figure 35 :** Relation entre Cl<sup>-</sup> et la teneur <sup>18</sup>O des eaux de l'oued Rhéraya

Sur la figure 35 on note une moyenne corrélation entre les teneurs en oxygène-18 et les teneurs en chlorures au niveau de l'oued Rhéraya. Cette corrélation est contrôlée par les teneurs en chlorures des eaux à la station de tahanaout. Où les trois points regroupés prélevés en mois de Juin ont des teneurs en chlorures qui sont faibles (65 mg/l) alors que les deux échantillons qui ont été prélevés en période des hautes eaux (en Avril) montrent des teneurs très élevées (314 mg/l). Cela peut être expliqué probablement par un apport d'eau provenant des affluents circulant dans des formations salifères, et qui se jette dans l'oued en période de fonte de la neige.

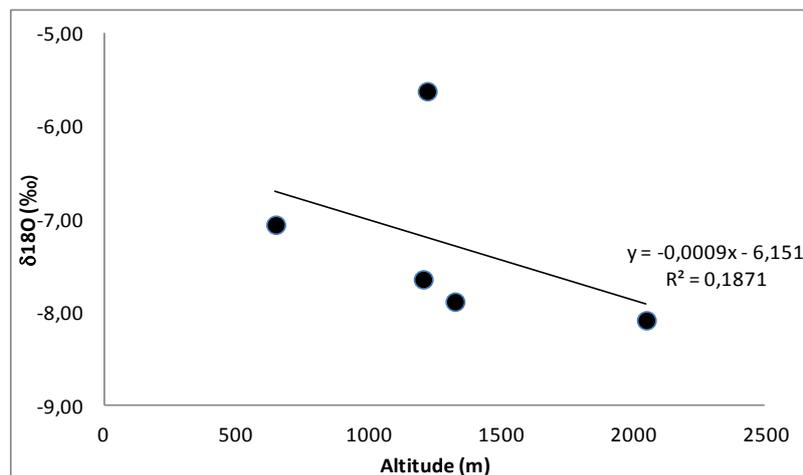


**Figure 36 :** Relation entre Cl<sup>-</sup> et la teneur <sup>18</sup>O des eaux souterraines du bassin Rhéraya

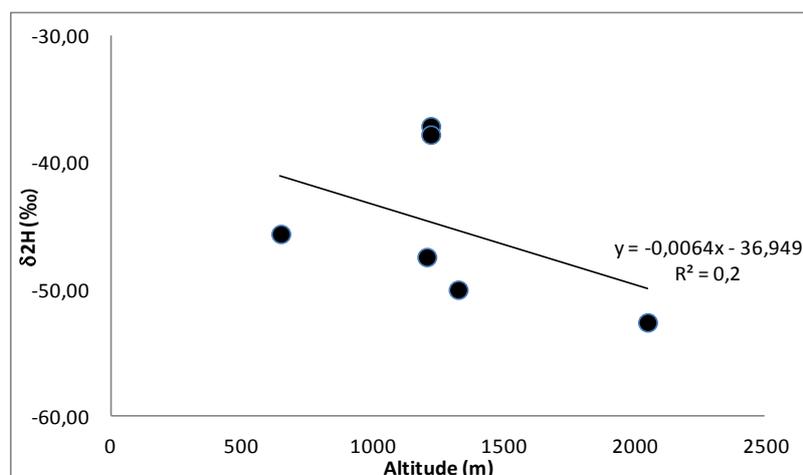
L'absence de corrélation entre les teneurs en oxygène-18 et les concentrations en chlorures au niveau des eaux souterraines du bassin Rhéraya, atteste d'une absence de tout phénomène d'évaporation de ces eaux avant et au cours de leur infiltration.

### II.1.3.2. Altitude de recharge

A fin de déterminer le mode de recharge des eaux souterraines, on a réalisé le diagramme oxygène-18 en fonction de l'altitude. L'absence de corrélation entre les isotopes stables et les altitudes des points de prélèvement dans bassin de Rhéraya témoigne que l'infiltration des eaux a été effectuée à des altitudes différentes des altitudes de prélèvement. et que les eaux ont été mélangé et brassé avant d'être infiltrées. Alors, il s'avère nécessaire de déterminer les zones de recharge des eaux en utilisant le gradient altitudinal établi par Raibi et al, 2004). Ce gradient qui est de 0,32 ‰ par 100m pour l'oxygène-18 et 2,96 ‰ par 100m pour deutérium

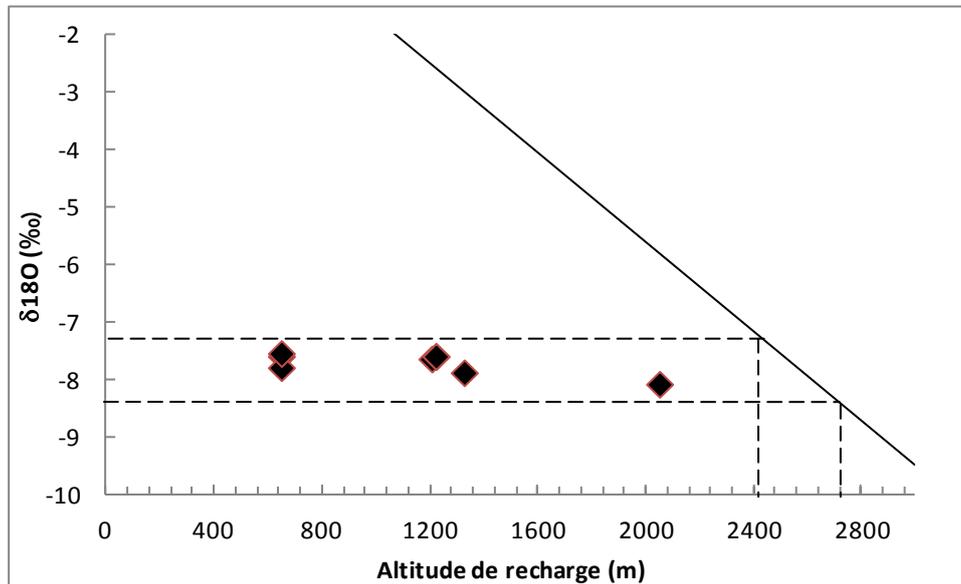


**Figure 37:** Relation entre  $^{18}\text{O}$  et les altitudes des points d'eau souterraine du bassin Rhéraya



**Figure 38 :** Relation entre Deutérium et les altitudes des points d'eau souterraine du bassin Rhéraya

En projetant les teneurs isotopiques en oxygène-18 des différents points échantillonnés sur la droite altimétrique, on a déterminé des altitudes de recharge entre 2400 et 2800 m. Sur la carte géologique du bassin ces altitudes correspondent aux formations magmatiques du Précambrien où s'effectue la recharge par infiltration directe à travers les fissures.



**Figure 39:** Relation oxygène-18 et altitude de recharge

#### ***II.1.4. Conclusion***

En conclusion pour ce bassin, le type des eaux au bassin de Rhéraya semble prendre son origine en hautes altitudes dans un contexte géologique où les eaux présentent une minéralisation faible et circulent rapidement à travers des formations fissurées. Au cours de leur circulation vers l'aval, les eaux traversent des formations triasiques salifères qui leur fournissent du Na, Cl, SO<sub>4</sub> et le Ca, donc les eaux acquièrent un surplus de minéralisation. Deux points sur ce bassin ont un comportement différents (Moulay Brahim) les eaux ont des concentrations relativement élevées par rapport aux autres points, ce qui peut être expliqué par le rencontre brutale des formations évaporitiques ainsi que l'influence du retour des eaux d'irrigation.

Les analyses isotopiques des eaux souterraines ont montrés le brassage et l'infiltration rapide des eaux à des altitudes de 2400 à 2800 travers un réseau fissural.

## **II.2. Caractérisation chimique et isotopique des eaux du bassin d'Ourika**

### ***II.2.1. Caractérisation physique des eaux***

#### **II.2.1.1. Les eaux de surface**

La conductivité électrique des eaux de l'oued Ourika augmente de l'amont vers l'aval. Ils varient de 131,8  $\mu\text{s/cm}$  à Setti Fadma et 192  $\mu\text{s/cm}$  à d'Aghbalou, avec une moyenne de 153,9  $\mu\text{s/cm}$ . Les données récentes (mission mars 2010 et avril 2012) montre des conductivités allant d'environ 92  $\mu\text{s/cm}$  à Setti fadma à 160  $\mu\text{s/cm}$  au niveau du pont de T'nin Ourika.

Par ailleurs, des petits affluents du bassin de l'Ourika drainent des eaux avec des conductivités moyennes de 300 à 500  $\mu\text{s/cm}$ .

Les valeurs de pH des eaux de surface dans le bassin d'Ourika sont généralement comprises entre 7,27 à Setti fadma et 7,50 à Aghbalou.

#### **II.2.1.2. Les eaux souterraines**

Les mesures de conductivité effectuées sur les eaux souterraines du bassin de l'Ourika montrent des valeurs qui s'inscrivent dans l'intervalle de 96,3  $\mu\text{s/cm}$  au niveau de la source d'Azrabzou située à une altitude de 1467 m, et 4190  $\mu\text{s/cm}$  au niveau de puits Boutbira situé à 865m d'altitude avec une moyenne de 1013,2  $\mu\text{s/cm}$ . En outre, le pH est moyennement basique avec des valeurs allant de 7,1 et 8,2. À l'exception de la source Oulmes qui a donné un pH relativement faible de l'ordre de 5,71.

### ***II.2.2. Caractérisation hydro-chimique des eaux***

Les analyses hydro-chimiques ont été effectuées sur neuf échantillons répartis le long du bassin d'Ourika (Tableau 8). Les résultats montrent une variation importante en composition chimiques des eaux en allant de l'amont vers l'aval du cours d'eau. La variation de la composition chimique a été effectuée à l'aide de l'analyse en composante principale.

#### **II.2.2.1. Les eaux de surface**

**Tableau 8:** Résultats d'analyses physico-chimiques des eaux de surface au bassin d'Ourika

Noms des échantillons	CE	Altitude	T°C	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	Ca <sup>++</sup> (mg/l)	Mg <sup>++</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	BI en %
Oued à Setti Fadma	131,8	1417	12	7,3	75,03	3,55	7,37	7,45	18,44	5,83	3,91	0,56	3
Oued après Azrabzou	138	1458	15	7,3	79,3	3,84	7,99	8,06	20,84	4,1	4,4	0,54	0
Oued à Aghbalou	192	1046	16,1	7,5	104,31	5,96	9,72	10,55	28,06	4,99	6,24	0,95	0

D'après le tableau les eaux de l'oued Ourika montre une faible minéralisation. On remarque une corrélation entre les éléments chimiques d'après le tableau précédent, à savoir les ions (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>) et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, ce qui peut être expliqué par le lessivage des formations gypsifères (CaSO<sub>4</sub>) d'une part et l'existence des rejets domestiques dans l'oued d'autre part. De même on note des corrélations entre les ions (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>) et Cl<sup>-</sup>, il s'agit dans ce cas soit de la dissolution de la halite (NaCl) ou d'une pollution d'origine anthropique (les eaux usées domestiques, contamination agricole...).

#### II.2.2.2. Les eaux souterraines

- *Etude statistique des résultats dans le bassin d'Ourika*

L'ACP a été effectuée sur l'ensemble des eaux échantillonnées en utilisant comme variables la température, le pH, la conductivité électrique, les éléments chimiques : Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et l'altitude.

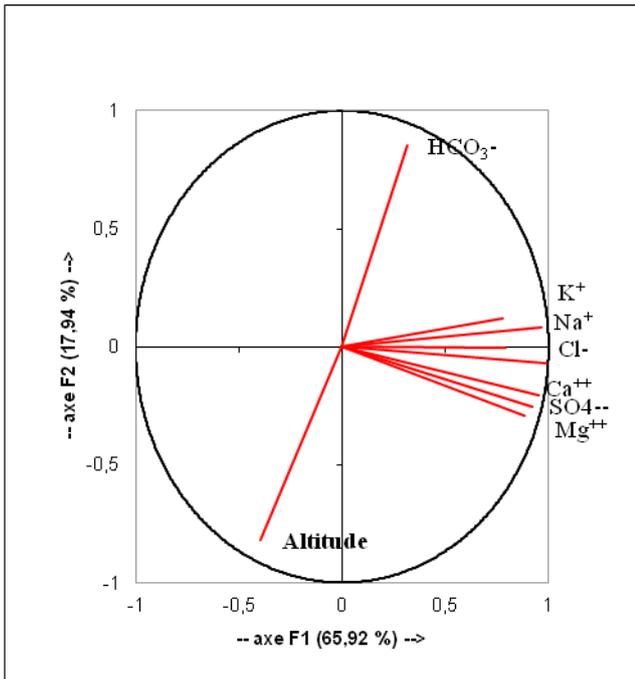
Le tableau suivant, regroupe toutes les corrélations existantes entre les différentes variables étudiées au niveau des points d'eau souterraine prélevés à différentes altitudes. On note que les balances ioniques de ces résultats varient de -8% à +3%.

**Tableau 9 :** Tableau des corrélations entre les variables étudiées pour les eaux souterraines du bassin Ourika.

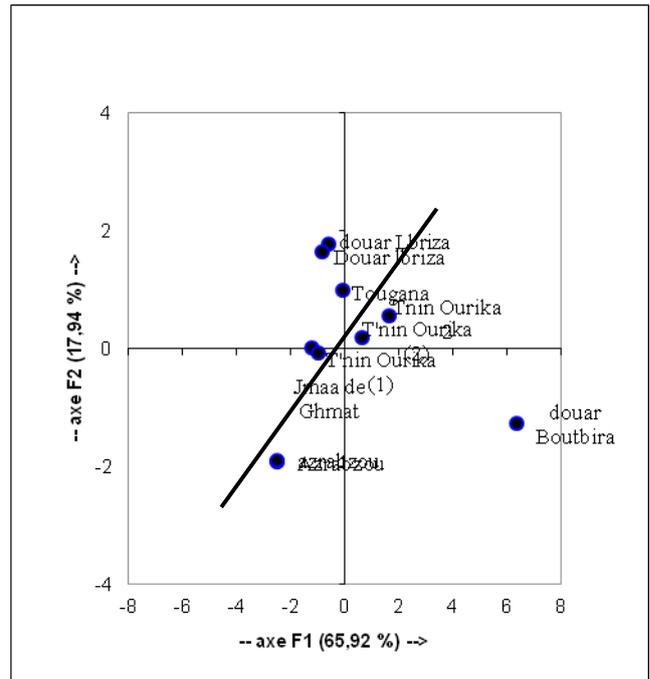
	CE	Altitude	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
CE	1								
Altitude	-0,328	1							
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,211	<b>-0,699</b>	1						
Cl <sup>-</sup>	<b>0,87</b>	-0,258	0,103	1					
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	<b>0,84</b>	-0,153	0,1	0,478	1				
Ca <sup>++</sup>	<b>0,924</b>	-0,233	0,171	0,624	<b>0,982</b>	1			
Mg <sup>++</sup>	<b>0,884</b>	-0,201	0,12	0,552	<b>0,995</b>	<b>0,993</b>	1		
Na <sup>+</sup>	<b>0,849</b>	-0,321	0,233	<b>0,989</b>	0,431	0,588	0,507	1	
K <sup>+</sup>	<b>0,914</b>	-0,429	0,448	<b>0,636</b>	<b>0,901</b>	<b>0,946</b>	<b>0,923</b>	<b>0,639</b>	1

Le tableau illustre les différentes corrélations qui se présentent entre les variables étudiées, les plus significatives sont:  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$ .

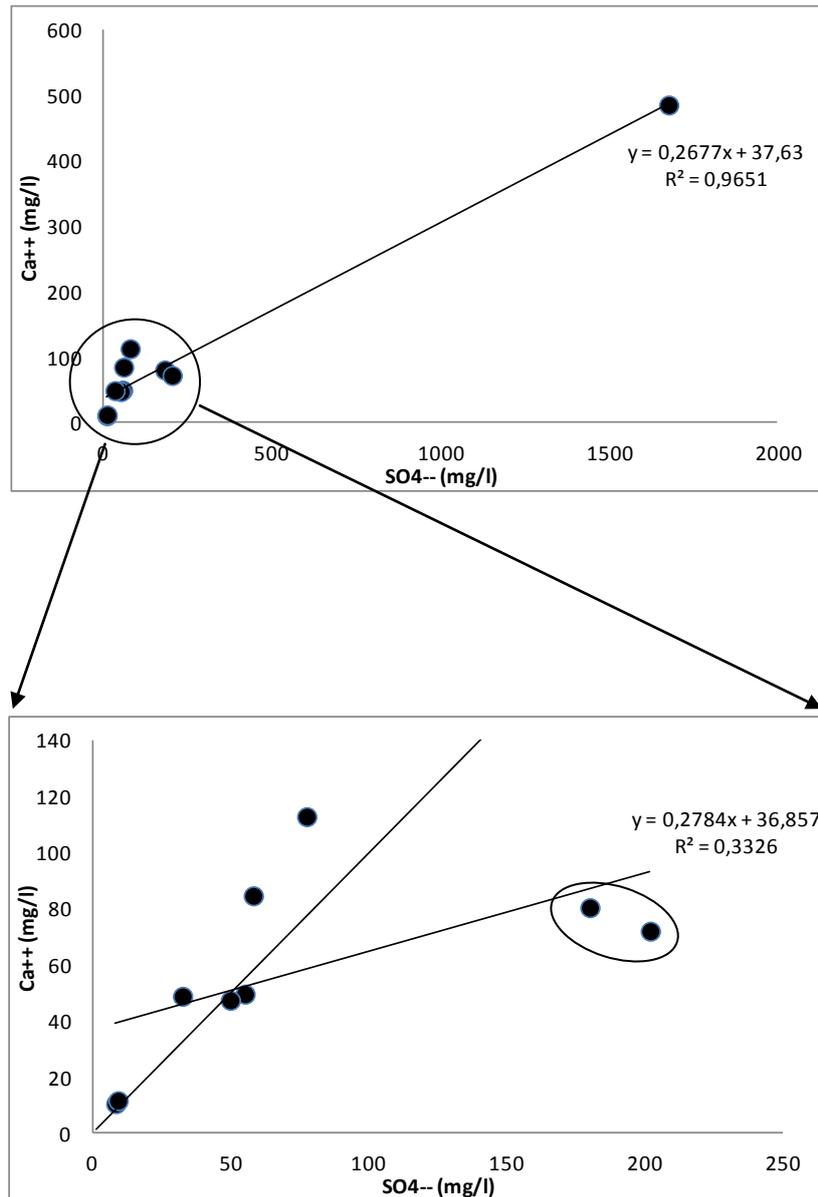
La dispersion des variables et des individus pour les points d'eau souterraine montre une évolution de l'amont vers l'aval. La source d'Azrabzou située à une altitude de 1467 m, présente la minéralisation la plus faible par rapport aux autres points tel que le puits de T'nin Ourika situé à 870 m d'altitude.



**Figure 40 :** Espace des variables



**Figure 41 :** Espace des individus

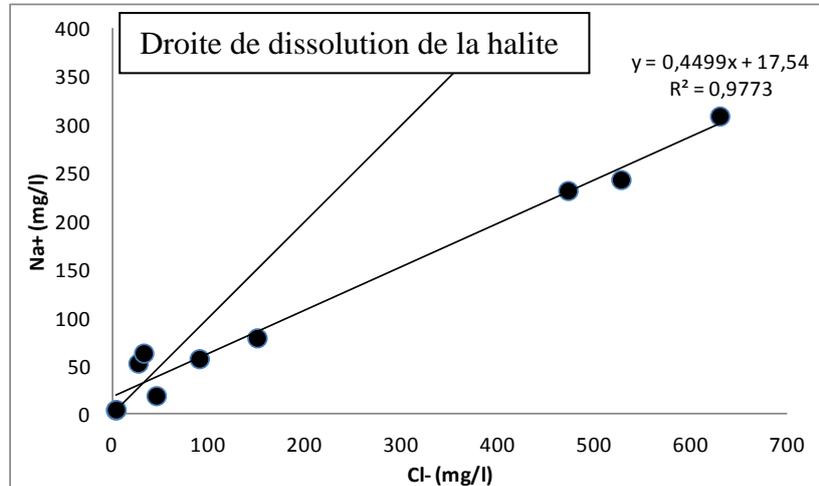


**Figure 42:** *Corrélation entre  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$*

La bonne corrélation entre  $Ca^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$  (Figure 42) montre la source commune de ces éléments. Tous les points s'alignent sur la droite de corrélation. On constate que l'échantillon prélevé à Douar Boutbira est démarqué du groupe formé des autres échantillons. C'est un point avec un comportement différent avec une conductivité électrique égale à 4190  $\mu\text{s}/\text{cm}$  où la concentration en sulfate atteint son maximum (1675 mg/l). Cette minéralisation exceptionnelle de ce point peut être due généralement à une contamination intense par le retour des eaux d'irrigation chargées en sulfates.

Pour mieux visualiser la corrélation qui existe entre le  $Ca^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$  au niveau des autres points à l'exception du point de Douar Boutbira, le deuxième graphe montre que la majorité des points suit l'allure de la droite de dissolution du gypse ( $CaSO_4$ ) montrant ainsi un

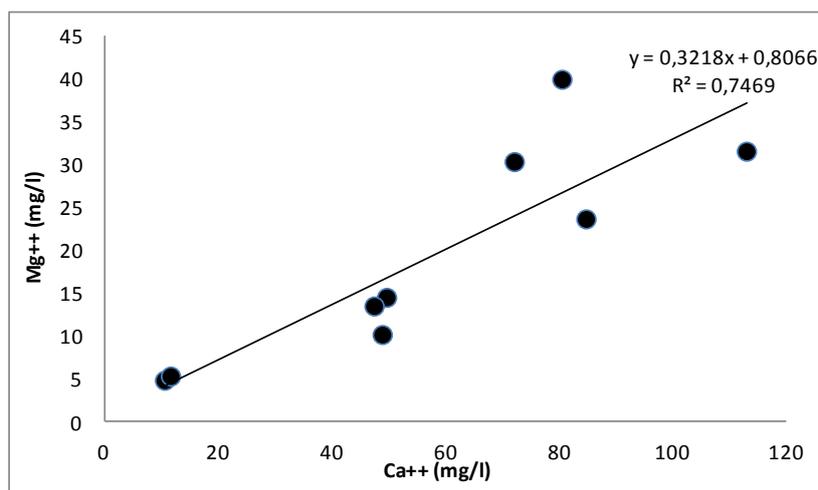
lessivage des formations gypsifère, sauf pour les deux points qui s'individualisent et montrent un enrichissement important en sulfates par rapport aux autres points. Ces points correspondent au puits de Jmaat Ghmat et Tougana, dont les conductivités sont respectivement 679 et 1081  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , et les teneurs en sulfates 180 et 201  $\text{mg}/\text{l}$ .



**Figure 43:** Corrélation entre  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ .

La corrélation positive entre les concentrations de  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  (Figure 43) montre que les points d'eau (Douar Boutbira, T'nin Ourika2, Tougana) sortent de la droite de dissolution de la halite ( $\text{NaCl}$ ) et montrent un enrichissement en chlorures et un appauvrissement en sodium par rapport aux autres points qui s'alignent généralement selon cette droite. Ceci peut être expliqué par l'intervention d'un processus d'échange cationique sur les argiles qui se trouvent généralement associées aux formations évaporitiques. Cet échange s'effectue fréquemment entre le sodium et le calcium.

Pour confirmer ceci, le graphe suivant montre la corrélation entre le  $\text{Ca}^{2+}$  et le  $\text{Mg}^{2+}$  des points d'eau à l'exception de point de Douar Boutbira, qui présente un comportement chimique spécial.



**Figure 44:** *Corrélation entre  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ .*

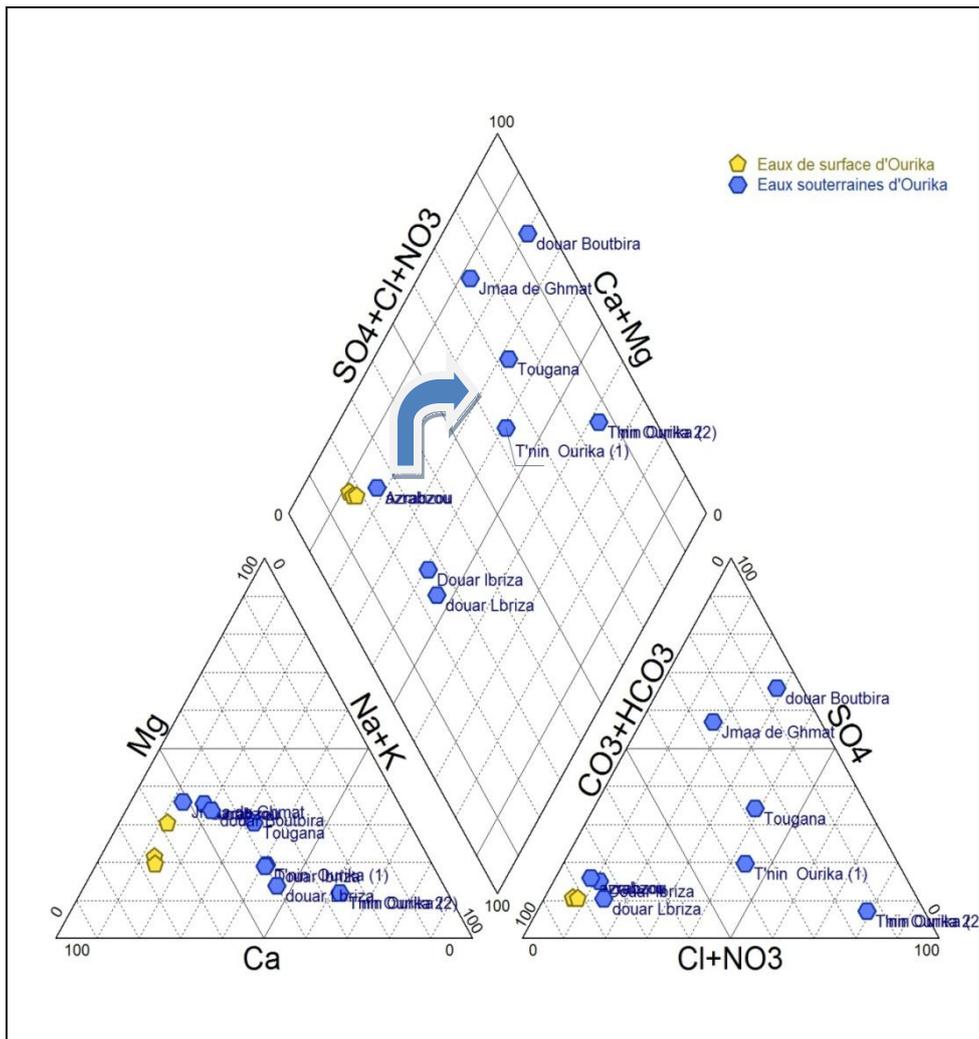
Le graphe de corrélation entre  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  affirme effectivement le processus d'échange cationique, où les points qui présentent par ailleurs l'appauvrissement en sodium sur le graphe de corrélation entre  $Na^+$  et  $Cl^-$  montrent un enrichissement en  $Ca^{2+}$ .

### II.2.2.3. Facies chimiques des eaux du bassin de l'Ourika

Le facies chimique des eaux variant du Sud vers le Nord (Figure 45) reflétant ainsi l'influence de la lithologie du bassin versant. En effet, dans les zones situées à des altitudes moyennes (<2000m) sont formées en grande partie par des dépôts de grés massif et des argiles permotriasiques. De ce fait, les eaux qui les ont traversés présentent un faciès sulfaté calcique et chloruré calcique, ceci est bien marqué au niveau des points d'eau souterraine suivants : le puits Tougana, puits Douar Boutbira, puits Jmaa de Ghmat et le puits de Tnin Ourika.

A des altitudes plus hautes, les eaux sont fraîches, circulent dans des terrains formés essentiellement des roches magmatiques et métamorphiques du précambrien. Le faciès des eaux est bicarbonaté calcique et magnésien, ceci se projette à la fois sur les eaux de l'oued et les points d'eau souterraine prélevés à des hautes altitudes, cas de la source Azrabzou (1467).

L'eau prélevée à douar Labriza est situé à une altitude plus basse, pourtant, il présente un faciès proche de celui de la source d'Azrabzou qui est située en haute altitude. Ceci peut être expliqué par le fait que les eaux alimentant ce puits ont circulés depuis l'amont vers l'aval (zone de recharge) dans des formations purement bicarbonatées.



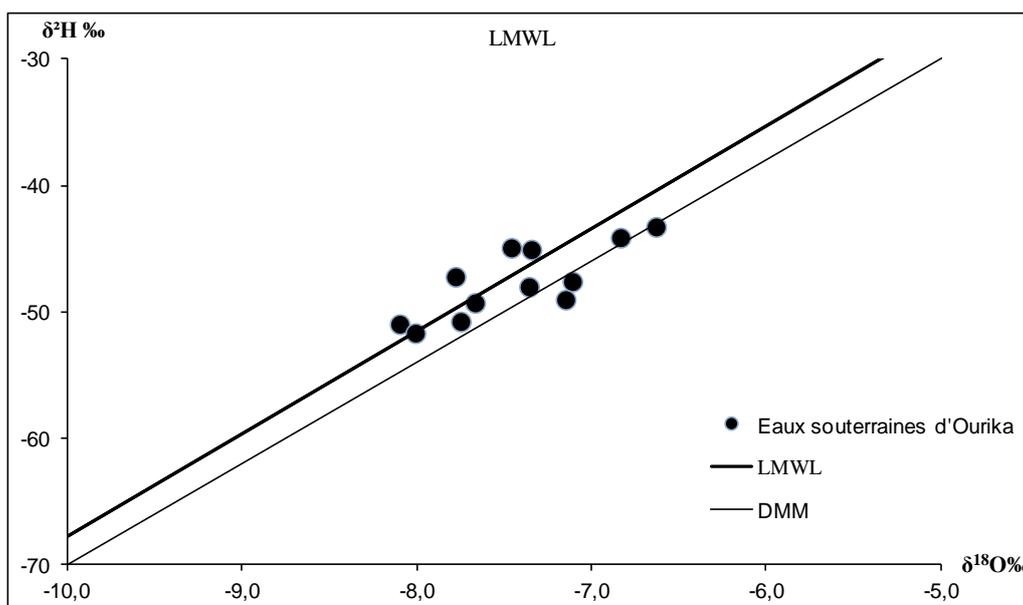
**Figure 45:** Présentation diagramme pour les eaux du bassin Ourika

### II.2.3. Traçage des eaux souterraines du bassin d'Ourika par le couple $^{18}\text{O}/^2\text{H}$

Les points d'eau souterrains (sources, puits et forages) échantillonnés dans le bassin de l'Ourika ont fait aussi l'objet d'analyses isotopiques portant sur le dosage des teneurs en oxygène-18 et deutérium.

Les eaux souterraines de la région d'Ourika montre des teneurs en oxygène-18 qui varient entre -6,63 ‰ vs SMOW au puits de douar Boutbira situé à 865 m d'altitude et -8,10‰ vs SMOW à la source d'Azrabzou à 1467 m d'altitude pour  $^{18}\text{O}$ , et de 43,26 et -50,96 ‰ vs SMOW pour  $^2\text{H}$ .

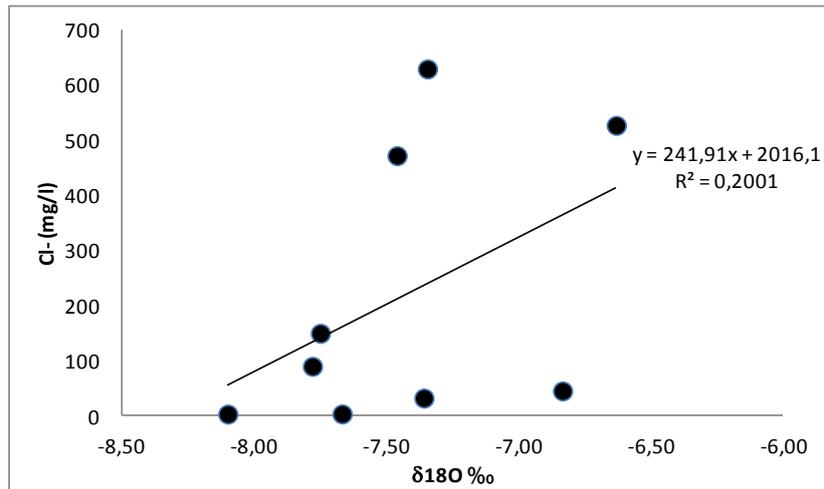
Les points représentant des eaux souterraines (figure 46) se répartissent sur la droite météorique locale et mondiale, ce qui montre donc l'absence de tout fractionnement isotopique des eaux de la nappe avant ou durant leur infiltration par l'évaporation.



**Figure 46:** Relation oxygène-18 - Deutérium dans les eaux souterraines du bassin Ourika.

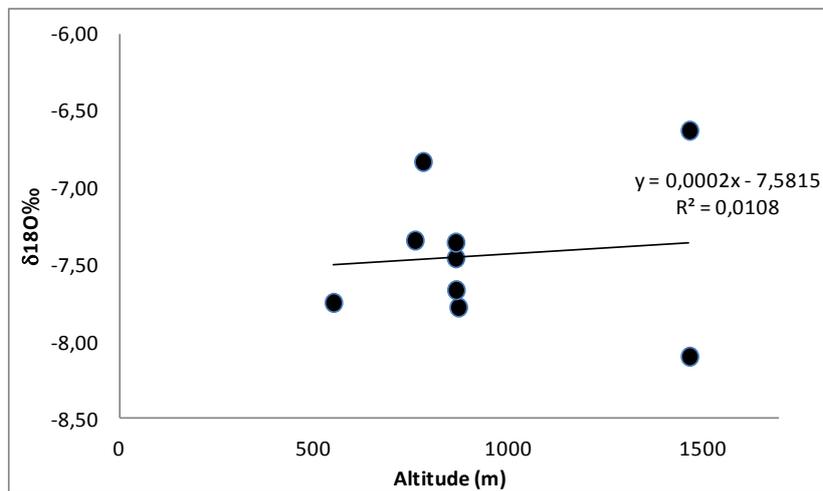
#### II.2.3.1. Relation oxygène 18 -Cl- des eaux souterraine du bassin d'Ourika

Sur la figure suivante, on constate qu'il n'existe pas de corrélation entre les teneurs en  $^{18}\text{O}$  et les teneurs en  $\text{Cl}^-$  des eaux souterraines du bassin Ourika. Ceci confirme l'absence d'évaporation des eaux avant leur infiltration.

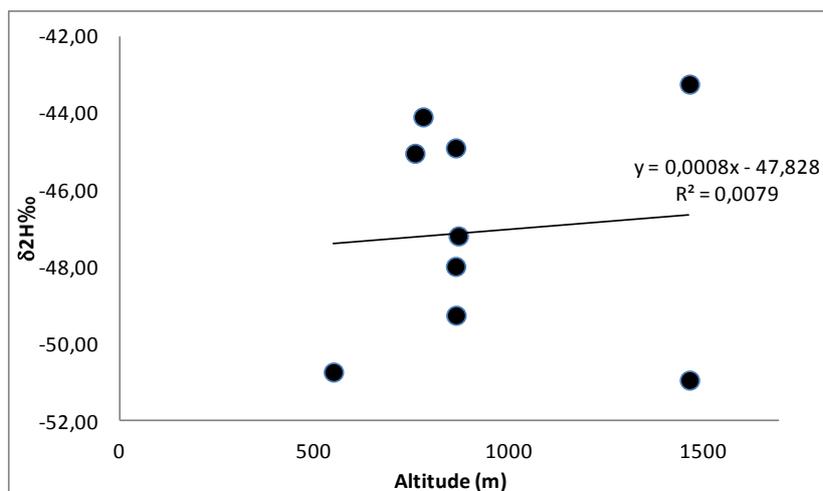


**Figure 47 :** *Corrélation entre les teneurs en  $^{18}\text{O}$  et les teneurs en Cl<sup>-</sup> des eaux souterraines du bassin Ourika.*

### II.2.3.2. Altitude de recharge

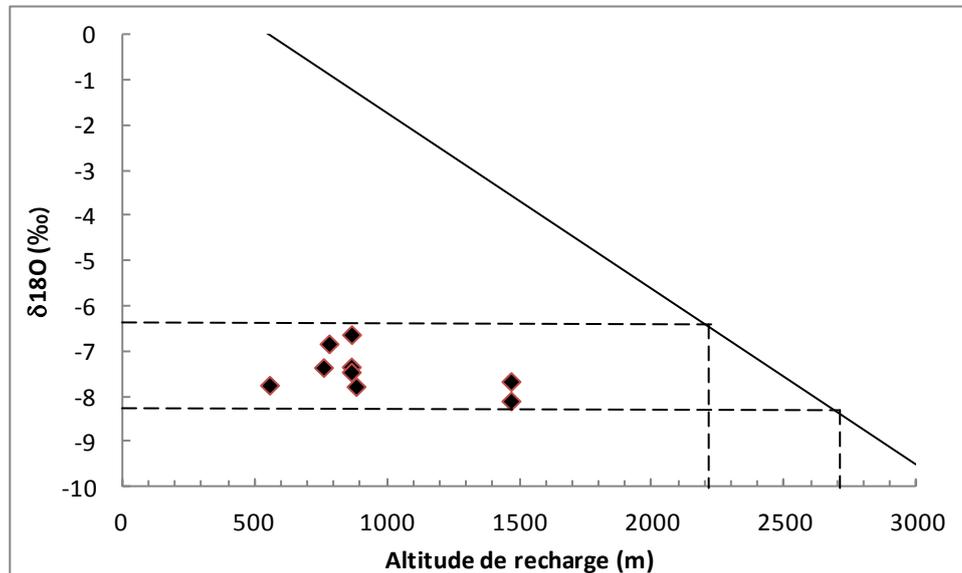


**Figure 48 :** *Relation  $^{18}\text{O}$  avec les latitudes des points d'eau souterraine*



**Figure 49 :** *Relation Deutérium avec l'altitude des points d'eau souterraine*

La relation entre les teneurs en  $^{18}\text{O}$  et les altitudes des points d'eau échantillonnés, ne montre pas de corrélation. On peut penser que la variation du signal isotopique se fait indépendamment de celle de l'altitude des points. Ce qui peut être expliqué par un mélange et un brassage des eaux avant d'être infiltrer à une zone de recharge.



**Figure 50 :** Relation oxygène-18 et altitude

En utilisant le gradient altitudinal du bassin de Tensift on a reportées les teneurs en  $^{18}\text{O}$  en fonction des altitudes de prélèvement. On a obtenu ainsi des altitudes de recharge qui se situeraient entre 2200 et 2700 m d'altitude. En superposant ces altitudes sur la carte géologique du bassin, on constate l'existence à ces altitudes de roches magmatiques du précambrien où s'effectue la recharge par infiltration directe à travers les fissures.

#### ***II.2.4. Conclusion***

La variation du chimisme du bassin d'Ourika s'avère analogue à celui du bassin de Rhéraya, où les eaux prennent leur origine en hautes altitudes, en zone formée d'un faciès bicarbonaté, qui leur donne la caractéristique des eaux fraîches. Au fur et à mesure que les eaux circulent vers l'aval, elles traversent des formations détritiques d'où elles acquièrent une minéralisation plus importante.

Les analyses isotopiques des eaux souterraines montrent que l'infiltration des eaux était rapide après brassage à travers les fissures sur des zones d'altitudes moyennes de 2200 et 2700 m.

## II.3. Caractérisation chimique et isotopique des eaux du bassin de Zat

### II.3.1. Caractérisation physico-chimique des eaux

Neuf échantillons ont été prélevés au niveau du bassin de Zat, correspondent à des eaux de sources et des eaux de puits répartis sur l'ensemble du bassin (Figure 25). La conductivité électrique mesurée en ces échantillons est variée entre 1292  $\mu\text{S}/\text{cm}$  au puits Tazert centre situé à l'aval du bassin à une altitude de 540 m et de 468  $\mu\text{S}/\text{cm}$  au niveau de la source d'Ait barka située à une altitude de 1294 m, avec une moyenne de 841,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Par ailleurs, les valeurs de pH de ces échantillons ne dépassent pas 7,5 à 7,6 indiquant un pH neutre à moyennement basique.

### II.3.2. Caractérisation hydro-chimique des eaux

Les analyses hydro-chimiques ont été effectuées sur une dizaine d'échantillons répartis le long du bassin Zat. Elles montrent que les eaux souterraines sont bien chargées en éléments chimiques. On note que les balances ioniques de ces résultats varient de 1% à 6%.

#### II.3.2.1. Etude statistique des résultats d'analyses au bassin de Zat

On a réalisé l'ACP sur l'ensemble des eaux échantillonnées. Nous avons utilisé comme variables les mesures physiques (température, pH, conductivité électrique) et les éléments chimiques ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) ainsi que l'altitude.

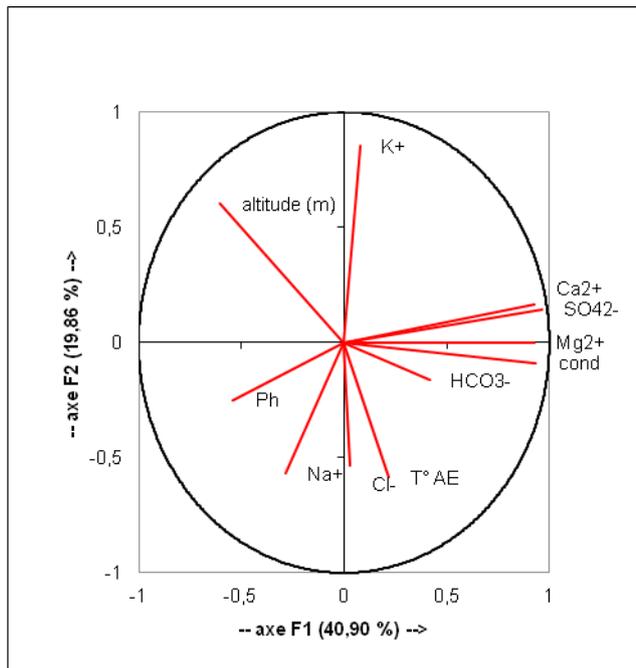
Le tableau suivant, met en évidence toutes les corrélations existantes entre les différentes variables étudiées.

**Tableau 10 :** Tableau des corrélations entre les variables étudiées pour les eaux souterraines du bassin de Zat

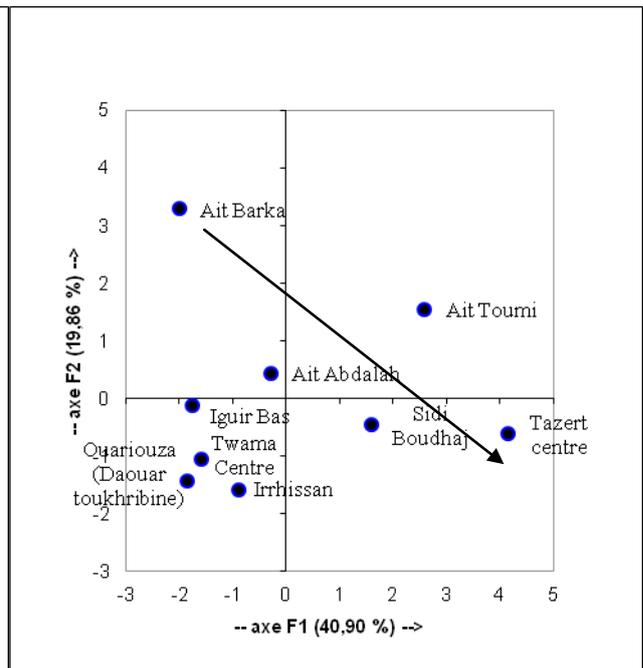
	Altitude	pH	CE	T°C	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$
Altitude	1										
pH	0,174	1									
CE	-0,533	-0,421	1								
T°C	-0,426	0,239	0,077	1							
$\text{HCO}_3^-$	0,093	-0,185	0,536	0,322	1						
$\text{Cl}^-$	-0,331	-0,050	0,296	-0,321	0,042	1					
$\text{SO}_4^{2-}$	-0,528	-0,400	<b>0,896</b>	0,171	0,333	-0,092	1				
$\text{Na}^+$	0,083	0,232	0,028	-0,130	0,357	<b>0,793</b>	-0,405	1			
$\text{Ca}^{2+}$	-0,522	-0,346	<b>0,864</b>	0,146	0,301	-0,098	<b>0,980</b>	-0,424	1		
$\text{Mg}^{2+}$	-0,533	-0,622	<b>0,858</b>	0,151	0,368	0,072	<b>0,857</b>	-0,221	<b>0,752</b>	1	
$\text{K}^+$	0,598	-0,124	0,173	<b>-0,715</b>	0,079	-0,140	0,214	-0,153	0,230	0,067	1

On ne constate que seules les variables suivantes :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  qui présentent des corrélations significatives.

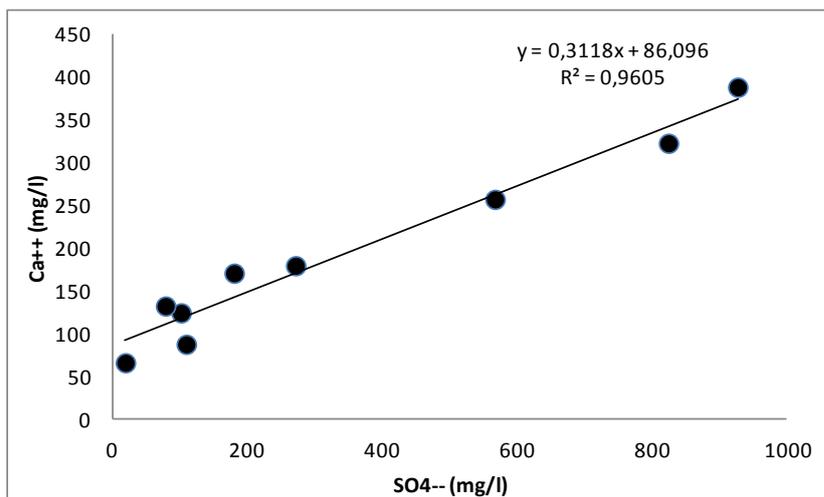
La dispersion des variables et des individus pour les points d'eau souterraine montre une individualisation de deux groupes. Au niveau du premier qui comprend les points d'Ait Barka, Ait Toumi, Sidi Boudhaj et Tazert centre, la minéralisation semble contrôlée par l'altitude qui évolue depuis le point Ait barka situé à haut altitude (1294 m) vers le point de Tazert centre à 540 m. au niveau du deuxième groupe, les points ont un comportement chimique différent semble contrôlé par la lithologie des zones parcourus par ces eaux.



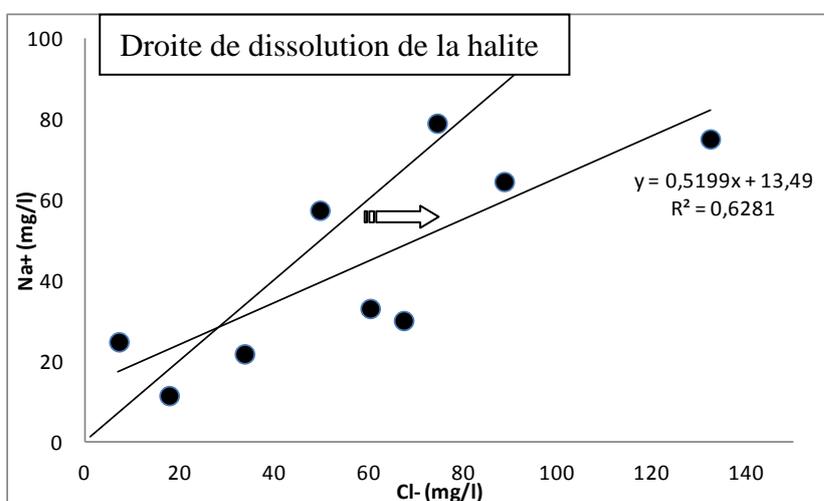
**Figure 51 :** Espace des variables



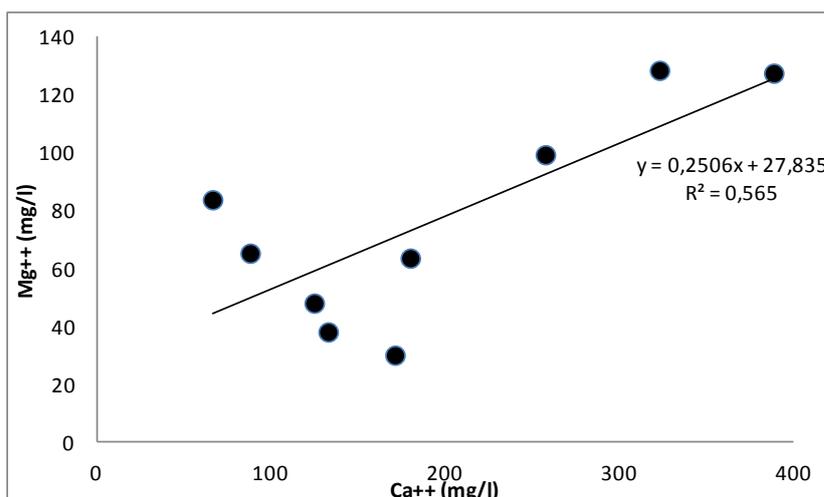
**Figure 52 :** Espace des individus



**Figure 53 : Corrélation entre  $Ca^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$**



**Figure 54 : Corrélation entre  $Na^+$  et  $Cl^-$**



**Figure 55 : Corrélation entre  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$**

La bonne corrélation entre  $Ca^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$ , souligne fortement le lien entre ces deux éléments et met en évidence la source commune qui est le gypse ( $CaSO_4$ ). Les concentrations

en sulfates sont généralement élevées, varient entre 18,2 mg/l à la source d'Irrhissan située à 880 m d'altitude, et 926,4 mg/l à la source de Tazert centre située à 540 m d'altitude. Dont la moyenne est 341,3 mg/l.

La corrélation positive entre le  $\text{Na}^+$  et le  $\text{Cl}^-$  dans les eaux du bassin de Zat, illustre bien l'évolution des chlorures en fonction du sodium, c'est le cas des quatre points (Source d'Ait Barka, forages Twama centre et Sidi Boudhaj et puits d'Ait Abdalah) qui se situent sur la droite de dissolution de la halite, dont la concentration moyenne en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  est respectivement : 42,4 mg/l et 43,9 mg/l. Un enrichissement en chlorures est marqué au niveau des points correspondant aux sources d'Irrhissan, Ouariouza, Tazert centre et Ait Toumi, dont la concentration moyenne en  $\text{Cl}^-$  est de 87,2 mg/l. Cet enrichissement en Cl peut être expliqué par l'évaporation des eaux avant infiltration ou par un apport atmosphérique.

#### **II.3.2.2. Facies chimiques des eaux**

Les résultats des analyses chimiques des sources et des puits échantillonnés sont reportés sur le diagramme de Piper (Figure 56). Cette représentation permet de souligner une diversité des faciès chimiques des sources et des puits, avec une forte représentativité des eaux ayant un faciès bicarbonaté calcique et magnésien correspondant au forage de Twama Centre et aux sources d'Ait Barka, Iguir bas et Irrhissan, échantillonnés à des hautes altitudes. Une tendance vers le pôle chloruré et sulfaté calcique et magnésien est marquée par la source d'Ouariouza et le puits d'Ait Abdelah. À noter toutefois la migration vers un faciès sulfaté calcique bien marqué au niveau de la source de Tazert centre et d'Ait Toumi, et du forage de Sidi Boudhaj.

La comparaison de la distribution géographique des points d'eau avec la carte géologique fait apparaître une coïncidence avec les différentes formations lithologiques.

Au niveau du bassin de Zat, on observe une distinction entre des points d'eau souterraine évoluant à partir d'un pôle calcique magnésien, représentant les points circulant au niveau des formations calcaires et magnésiennes du Viséen. Et d'un pôle bicarbonaté calcique et magnésien avec une tendance vers le pôle sulfaté calcique et chloruré calcique avec une dominance des sulfates sur les chlorures, que représentent les eaux circulant au niveau des formations évaporitiques du Permo-Trias continental.

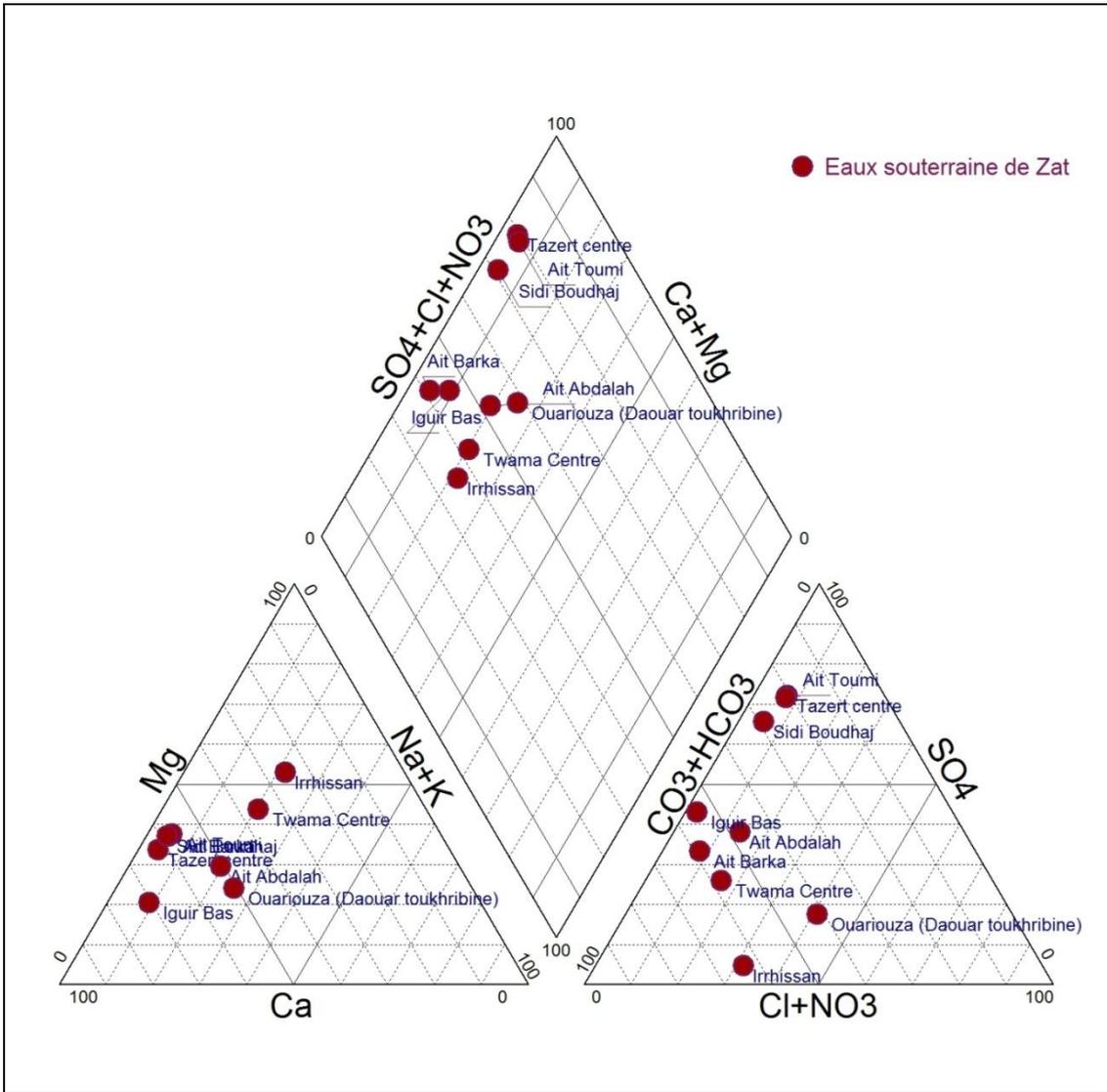


Figure 56 : Représentation des eaux dans le diagramme de Piper

### II.3.3. Traçage des eaux souterraines du bassin de Zat par le couple $^{18}\text{O}/^2\text{H}$

Afin d'étudier l'origine des eaux souterraines, 15 échantillons prélevés du bassin de Zat ont fait l'objet d'analyses isotopiques.

Les eaux souterraines (sources et forages) du bassin de Zat affichent des teneurs en oxygène-18 qui varient entre  $-7,46\text{‰}$  SMOW au forage de Sidi Boudhaj situé à 822 m d'altitude et  $-4,89\text{‰}$  SMOW à la source d'Irrhissan située à 880 m d'altitude. Sur l'ensemble des échantillons, la teneur moyenne en  $^{18}\text{O}$  est de  $-6,19\text{‰}$  SMOW. Les teneurs en deutérium oscillent entre  $-47,49\text{‰}$  SMOW et  $-26,65\text{‰}$  SMOW avec une moyenne de  $-36,70\text{‰}$  SMOW.

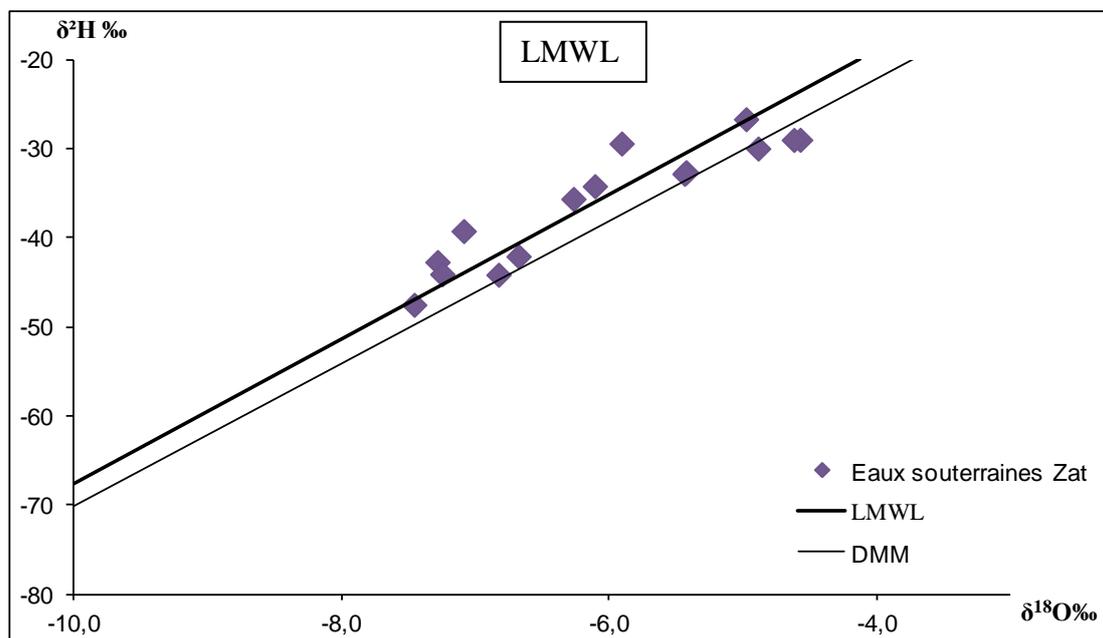


Figure 57 : Relation oxygène-18 - deutérium dans les eaux souterraines du bassin Zat.

La majorité des points se situe sur ou à proximité de la droite météorique locale (DML) ce qui dénote l'absence de fractionnement par évaporation.

#### II.3.3.1. Relation oxygène-18-Cl<sup>-</sup> des eaux souterraines du bassin de Zat

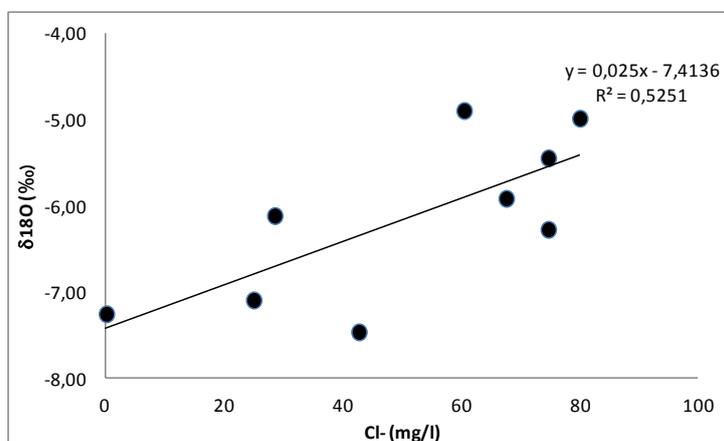


Figure 58 : Corrélation entre l'oxygène-18 et Cl<sup>-</sup> des eaux souterraines du bassin Zat.

La combinaison des teneurs en oxygène-18 avec celles des chlorures sur l'ensemble des points analysés montre une faible corrélation ce qui traduit une très faible évaporation des eaux avant infiltration.

### **II.3.3.2. Détermination de la recharge des eaux par le tritium**

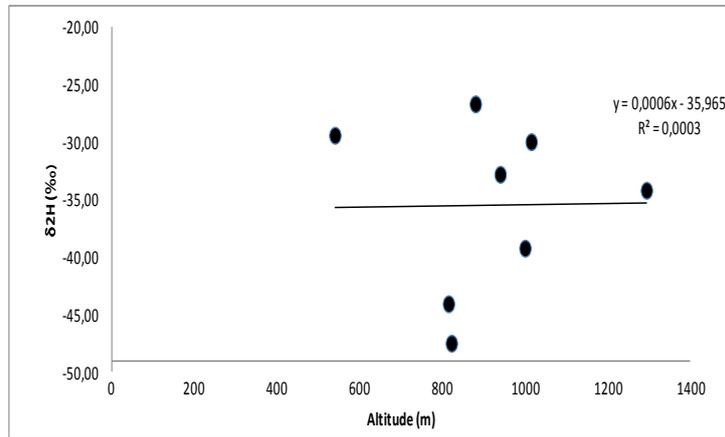
Afin d'estimer le temps de séjour des eaux souterraines dans les formations aquifères, des datations par Tritium ont été effectués sur neuf échantillons d'eau prélevés du bassin.

Dans les eaux du bassin de Zat, les teneurs en tritium varient de 0.07 à 6,83 UT, et on distingue :

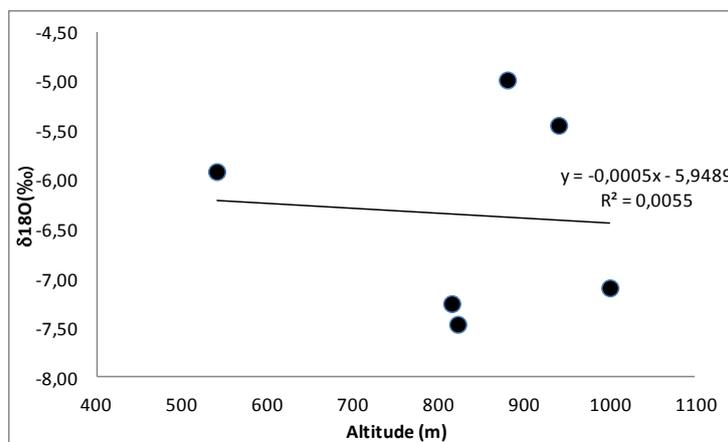
- Des eaux qui enregistrent des teneurs en Tritium  $>$  à 5UT. Ces fortes teneurs témoignent d'une recharge récente des eaux captées par ces points. Ça correspond aux eaux prélevées des sources d'Irrhissan, Ait Barka et Ouariouza.
- Des eaux qui ont une teneur  $<$  à 1 U.T. Ces points captent des eaux anciennes ayant un âge antérieur aux essais nucléaires de 1963. Ça coïncide sur la carte avec le puits d'Ait Abdellah et le forage de Sidi Boudhaj.
- Des eaux qui ont des teneurs en Tritium entre 1 et 5 UT. La présence du Tritium dans ces eaux témoigne de la contribution des eaux récemment infiltrées dans l'alimentation des aquifères captées par ces forages ou bien ce sont des eaux qui représentent le mélange des eaux des deux groupes précédemment cités. C'est le cas de la source de Tazert centre, d'Iguir bas et le forage de Twama centre.

### **II.3.3.3. Altitude de recharge**

La relation entre les teneurs en  $^{18}\text{O}$  et les altitudes des points d'eau échantillonnés, ne montre pas de corrélation. On peut penser que la variation du signal isotopique se fait indépendamment de celle de l'altitude des points. Ce qui peut être expliqué par un mélange et un brassage des eaux avant d'être infiltrer à une zone de recharge.

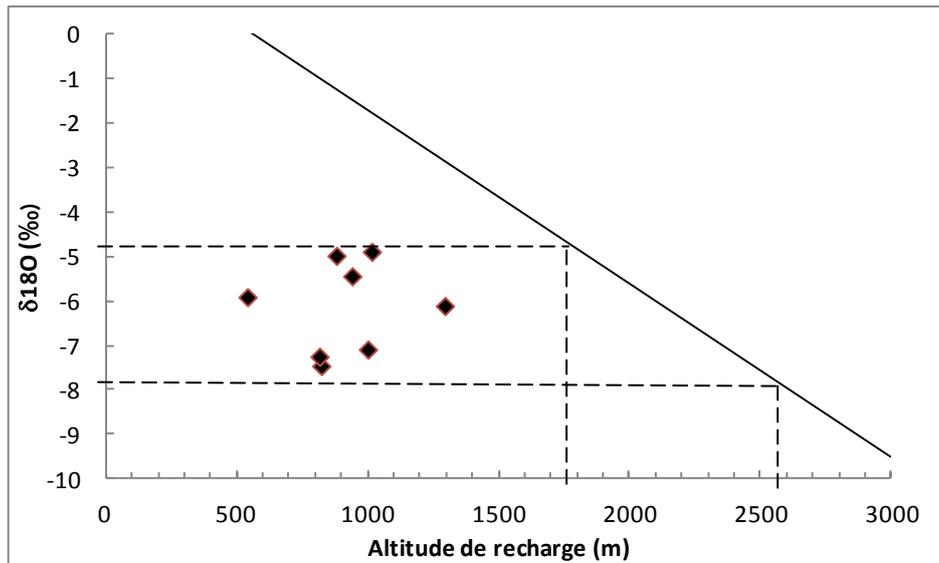


**Figure 59 :** *Corrélation entre et Deutérium et Altitude des eaux souterraines du bassin Zat*



**Figure 60 :** *Corrélation entre <sup>18</sup>O et altitude des points d'eau souterraine du bassin Zat*

A partir de la droite altitudinale de la région de Tensift et en projetant les teneurs en isotopes stables des différents points d'eau échantillonnés. Ces points ont été rechargés donc à des altitudes entre 1700 et 2600 m. sur la carte géologique ces altitudes concordent à des formations magmatiques du Précambrien au tiers Sud du bassin et à des formations sédimentaires du Permo-Trias.



**Figure 61** : Relation oxygène-18 et altitude.

### ***II.3.4. Conclusion***

Un comportement chimique au niveau du bassin de Zat apparaît légèrement différent des deux bassins précédemment étudiés. Les eaux prennent leur origine dans les hautes altitudes sur deux formations différentes, d'où la variation de la minéralisation des eaux et l'individualisation de deux groupes d'eau en fonction du trajet traversé.

Les analyses isotopiques montrent une légère évaporation qui s'observe au niveau de certains points. L'infiltration des eaux s'est effectuée à travers deux formations de nature lithologique différentes sur une altitude entre (1700 et 2600m). L'âge des points permet la distinction entre des eaux récentes témoignant d'une recharge actuelle, d'autres d'âge plus ancien, retenues dans des formations détritiques secondaires et en fin des eaux qui présentent un mélange entre les deux.

## **Conclusion générale**

La caractérisation hydrogéochimique et isotopique des eaux de surface et des eaux souterraines des trois sous bassins (Ourika Rharaya et Zat) du bassin de Tensift a permis de comprendre le fonctionnement hydrologique de ces trois bassins.

Concernant le bassin de Rhéraya les eaux semblent prendre leurs origines en hautes altitudes dans un contexte géologique où les eaux présentent une minéralisation faible et circulent rapidement à travers des formations fissurées. Au cours de leur circulation vers l'aval, les eaux traversent des formations triasiques salifères où les eaux acquièrent un surplus de minéralisation. Les analyses isotopiques des eaux souterraines ont montrés le brassage et l'infiltration rapide des eaux à des altitudes de 2400 à 2800 m travers un réseau fissural.

Le bassin d'Ourika présente un fonctionnement hydrologique proche de celui de Rhéraya. Les eaux dans ce bassin prennent également leur origine en hautes altitudes. Au fur et à mesure que les eaux circulent vers l'aval, elles traversent des formations détritiques d'où elles acquièrent une minéralisation plus importante. A des altitudes variantes entre 2200 et 2700 m les eaux se mélangent avant d'être infiltrées via des formations fissurées.

Le bassin de Zat apparaît légèrement différent des deux bassins précédemment étudiés. Les eaux prennent leur origine dans les hautes altitudes à environ 1700 et 2600 m sur deux formations différentes, d'où la variation de la minéralisation des eaux et l'individualisation de deux groupes d'eau en fonction du trajet traversé.

Les teneurs en tritium des eaux de ce bassin permettent la distinction entre des eaux récentes témoignant d'une recharge actuelle, d'autres d'âge plus ancienne retenues dans des formations détritiques secondaires et en fin des eaux qui présentent un mélange des eaux anciennes et des eaux récentes.

## **Perspectives**

En perspective une étude plus précise des âges des eaux, ainsi qu'un échantillonnage de plus des eaux souterraines et de surface en aval et en amont des bassins est recommandée afin de mieux comprendre la contribution de ces eaux dans la recharge générale des eaux souterraines du bassin de Tensift.

Il est recommandé également d'étaler l'étude sur d'autres sous bassins du bassin de Tensift.

# Annexe 1



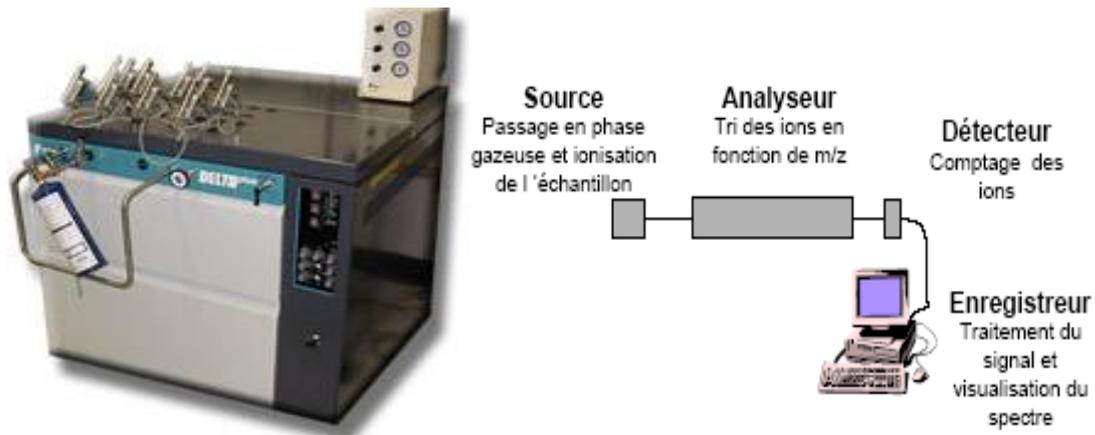
**Figure 1 :** *Photo montrant le dosage volumétrique réalisé au laboratoire*



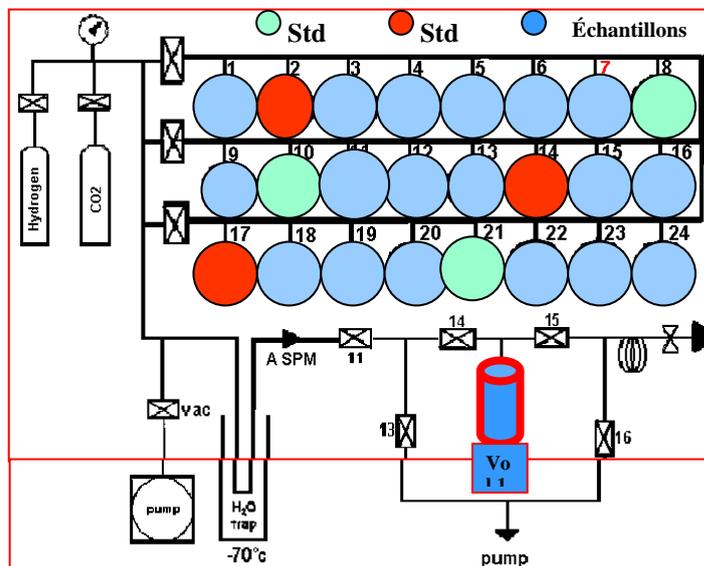
**Figure 2 :** *Photos montrant l'appareillage utilisé en chromatographie ionique.*



**Figure 3 :** *Photos du spectromètre de masse et Schéma du système d'équilibration*



**Figure 4:** Un spectromètre de masse avec ses quatre parties composantes



**Figure 5 :** schéma d'un système d'équilibration

### 8. Le carbone-14

Le carbone-14 est un radioélément utilisable pour dater les eaux souterraines anciennes. Sa période de désintégration relativement longue de  $5\,730 \pm 40$  ans, ce qui permet théoriquement dans le cas d'un système clos vis-à-vis du Carbone Inorganique Total Dissous (CITD), des datations d'eaux souterraines allant jusqu'à 35 000 ans.

Pour se faire, le principe de la datation, consiste à extraire le maximum des atomes de carbone de l'échantillon à dater sous forme d'un composé liquide, et mesurer ensuite son activité en  $^{14}\text{C}$ .

Au laboratoire de l'unité (Eau et Climat) où s'est déroulé mon stage, la détermination de la teneur en carbone-14 se fait selon une technique dite classique, qui a pour but de mesurer l'activité du carbone extrait de l'échantillon sous forme  $\text{C}_6\text{H}_6$  (Benzène) dans un spectromètre à scintillation liquide (SSL). La synthèse est effectuée en quatre principales étapes, dans une ligne en verre (figure 28), où le processus se déroule totalement sous vide afin d'éviter toute contamination par l'air ambiant, qui aurait pour conséquence de rajeunir l'âge de l'échantillon à travers un apport aussi faible soit-il de carbone-14.

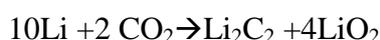


**Figure 6 :** *photo de la ligne de synthèse du benzène au laboratoire d'analyses des isotopes radioactifs*

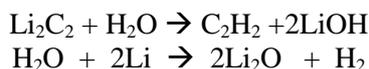
Les étapes de la synthèse du benzène sont comme suit :

- Formation du CO<sub>2</sub>
- Carburation du lithium
- Hydrolyse du carbure de lithium (obtention de l'acétylène)
- Trimérisation de l'acétylène (obtention du benzène)

Le précipité de carbonate passe d'abord par l'étape de la production du CO<sub>2</sub>, où le carbone de l'échantillon se transforme en dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> suite à une attaque par l'acide ortho phosphorique (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). Le gaz produit est mis en contact avec le lithium dans un four pour produire le carbure de lithium Li<sub>2</sub>C<sub>2</sub> selon la réaction suivante :



Une réaction d'hydrolyse se crée en introduisant l'eau distillée dans le four qui contient le carbure de lithium. Cette étape donne naissance au gaz d'acétylène selon la réaction suivante :



Ensuite, pour obtenir une molécule de Benzène on procède à une trimérisation de l'acétylène à l'aide d'un catalyseur, dont l'élément actif est le Cr<sup>3+</sup>. L'acétylène est mis en contact avec ce catalyseur et subi une trimérisation.



A la fin de la catalyse, le benzène est transféré dans des flacons pour subir un comptage par la suite dans un spectromètre à scintillation liquide pour donner l'âge conventionnel du carbone-14.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**Agence du Bassin Hydraulique de Tensift**, (non daté) le bassin versant de l'oued Zat, note interne, 17 p.

**A.I.E.A., 1981** - Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. Tech. Rep. Ser. N°210, I.A.E.A., Vienna.

**A.I.E.A., 1983** - Guidebook on nuclear techniques in hydrology. Tech. Rep. Ser. N°91, I.A.E.A., Vienna.

**Aranyossy, J. F., Filly, A., Tandia, A. A., Ousmne, B., Louvat, D., Fontes, J. C., 1991**- Estimation du flux d'évaporation sous couvert sableux en climat hyper aride (erg de Bilma, Niger). Isotope techniques in water resources development 1991. (Proc; Symp. Vienna), 309-324.

**Blavoux B., 1978** - Etude de cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du Tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse d'Etat, Univ. De P. et M. Curie, Paris6. 286 p.

**Blavoux, B. & Lettole, R., 1995** – Apports des techniques isotopiques à la connaissance des eaux souterraines. Géochronique, 54, 12-15.

**Chaponniere A., 2005** - Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride. Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain). Thèse de Doctorat de l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon, France, 233 p.

**Craig, H., 1954** - Carbon 13 in plants and the relationship between carbon 13 and carbon 14 variations in nature. J. Geol. ; 62, 115-141.

**Craig H., Gordon L. & Horibe Y., 1963** - Isotope exchange effects in the evaporation of water. 1. Low-temperature experimental results. Jour. Geophys. Res., 68: 5079-55087.

**Craig, H., 1957** - Isotopic standards for carbon and oxygen and factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide, Geochim. Cosmochim.Acta, 12: 133-149.

**Craig, H. 1961** - Standard for reporting concentration of deuterium and oxygen-18 in natural waters. Science, Vol. 133, p. 1833-1834

**Cruette, J. 1975** - Pluviométrie du bassin du Tensift. DRE Maroc, ORSTOM France.

**DRE. 1988** - Etude du plan directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins Sebou, Bou, Regreg, Oum er Rbia et Tensift. DRE (Maroc), Motor Columbus (Suisse), Coyne et Bellier (France), CID (Maroc), Ingema (Maroc).

**Direction Générale de l'Hydraulique. 1988** - Etude du plan directeur intégré d'Aménagement des eaux des bassins Sebou, Bou Regreg, Oum Er Rbia et Tensift. Sous mission III B.Hydrologie. Texte.179p + Dossier cartographique. Doc. Interne.

**Dever, L., 1985** - Approches chimiques et isotopiques des interactions fluides- matrices en zone non saturée carbonatée. Th., Un.. Paris-Sud (Orsay), 196p.

- Dansgaard W., 1964** - Stables isotopes in precipitation. *Tellus*, XVI, P. 435-468.
- Ehhalt D., Knott K., Nagel J.F. & Vogel J.C., 1963** - Deuterium and oxygen-18 in rain water. *Jour. Geophys. Res.*, 68 : 3775-3780.
- Edition du service géologique du Maroc. 1977** - Ressource en Eau du Maroc – Domaines Atlasique et sud-atlasique N° 231.
- Fontes, J. CH., 1976** - Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse de Doct. D'Etat, Univ. Paris VI, 208p.
- Fontes, J. Ch et Olivry, J. C., 1976** - Gradient isotopique entre 0 et 4000 m dans les précipitations du mont Cameroun. Résumé C. R. Réunion. Ann. Sc. Terre, Paris, Soc. Géolo. Fr.
- Fontes, J. Ch., 1982** - Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle, Stable Isotope Hydrology 1982 (technical reports series N°210, Vienna, 1982) p.273-298, IAEA, Vienna.
- Fontes, J. Ch., 1983** - Dating of groundwater 3, Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology, Tech. Rep. Ser. N 91, Second edition, IAEA, Vienna (1983) 285.
- Fontes J. Ch. & Gonfiantini R., 1967** - Comportement isotopique au cours de l'évaporation des bassins sahariens. *Earth Planet. Sc. Lett.*, 3, 259-266.
- Firtz P. & Fontes J-C., 1980** - Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, vol. 1, The Terrestrial Environment, B. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 545p.
- Gonfiantini, R., 1984** - Advisory group meeting on stable isotope reference samples for geochemical and hydrologic investig. Rep; Director general IEAA, Vienna.
- Haloui, B. 1986** - Contribution à l'étude du milieu et de la végétation du bassin versant de l'oued Rehraya (Haut Atlas de Marrakech)," Thèse de l'Université de Cadi Ayyad, Faculté des Sciences de Marrakech.
- Juillerat M., 2004** - Etude hydrologique comparative de 5 bassins versants du Haut Atlas marocain. Rapport de maîtrise de l'Université de Franche-comté Besançon, France, 69 p.
- Mook W.G., Bommerson J.C. & Staverman W.H. (1974)** - Carbon isotope fractionation between dissolved bicarbonate and gaseous carbon dioxide. *Earth and Planetary Science Letters*, 22, 169-176.
- Marjoua A., Olive P. & Jusserand, C., 1997** - Apports des outils chimiques et isotopiques à l'identification des origines de la salinisation des eaux. Cas de la nappe de la Chaouia cotière (Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau*, 4, 489-505.
- Marcé A., 1975** - Contribution des molécules isotopiques à l'étude des modalités d'alimentation et de renouvellement des réserves de quelques nappes souterraines du Maroc. Rapport du Ministère des Travaux Publics et des Communications. Ed. BRGM, 75SGN 44.

**Ministère de l'Agriculture et de la Mise en Valeur Agricole (MAMVA), 1991** - Plan national d'Aménagement des Bassins versants. Bilan des connaissances. Vol. 4 : 14-15 et 72-73. Doc. Interne.

**Nir, A., 1967**- Essai d'application des variations de teneurs en radiocarbone dissous à l'étude des aquifères libres: le cas de la nappe phréatique au Nord et à l'est du Tchad. Thèse 3eme cycle, Uni. Paris VI, 160p.

**Ouagga T., 2005** - Etude de l'effet des modes d'occupation des sols et de l'érosion sur la séquestration du carbone et l'agrégation des sols dans le bassin versant de la Rhéraya (Haut Atlas du Maroc); mémoire de 3<sup>o</sup> cycle pour l'obtention du diplôme d'ingénieur des eaux et forêts; école nationale forestière d'ingénieurs; 82 p.

**Pascon, P. 1977** - Le Haouz de Marrakech. Thèse de Doctorat d'Etat, 2 tomes, 693 p., Rabat.

**Ramromi, A., 2007** – les crues en zone montagneuse semi aride le cas des bassins de R'Dat et Zat (Haut Atlas ; Maroc). Mémoire de fin d'études, Maîtrise Es Sciences et Techniques d'hydrogéologie. FSTG, Marrakech.

**Rmich A., Hafoud N. 2004** - Relation entre les précipitations et les débits au niveau du bassin versant de la Rhéraya de 1962 à 2003. Mémoire de fin des études, Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech. Pages : 27 – 33

**Riad, S. 2003** - Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse en cotutelle, université des sciences et techniques de Lille et université Ibnou Zohr d'Agadir.

**Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., and Gonfiantini, R., 1993** – Isotopic patterns in modern global precipitation. Geophys. Monogr. Seri., AGU, Climate Change in Continental Isotopic record.

**Saidi M. E., Agoussine M. et Daoudi L., 2006** - Effet de la morphologie et de l'exposition sur les ressources en eau superficielle de part et d'autre du Haut Atlas (Maroc) ; exemple des bassins versants de l'Ourika et du Marghène. Bulletin de l'Institut Scientifique, section Sciences de la Terre n°28, Rabat p. 41-49.

**Saidi M.E., Daoudi L., Aresmouk M.E.H, Fnguire F., Boukrim S. 2010** - Les crues de l'oued Ourika (Haut Atlas, Maroc): Événements extrêmes en contexte montagnard semi-aride. Comunicações Geológicas, t. 97, Lisbonne, pp. 113-128.

**Saliège, J. F., Fontes, J. Ch., 1984** - Essai de détermination expérimentale du fractionnement des isotopes Carbone-13 et 14 au cours de processus naturels, Int. J. Applied Radiation and Isotopes(1984). 35, n° 1, 55-62.

**Sonntag G., Munich K.O et Jacob H., 1983** - Variation of deuterium and oxygène-18 in continental precipitation and groundwater ; and their causes. In secret-perrot; A., Beran, M. and Ratcliffe, R (eds). Variation in the global water buget. D. Reidel Pub. Co., Boston p.107 124.

**Vogel, J. C., Grootes, P. M., Mook, W. G., 1970** - Isotope fractionation between gaseous and dissolved carbon dioxide: Zeitschrift fur Physik, v.230-238.

**Yurtsever, Y. and Gat, J. R., 1981** - Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. Technical report series n° 210. IAEA Vienna. Pp. 103-139.

**Zuppi, G.M., Fontes, J. CH., Letolle, R., 1974** - Isotopes du milieu et circulations d'eaux sulfurées dans le latium. In : « Isotope Technique in groundwater Hydrology 1974. Proceed. Symp., I.A.E.A., Vienna, Vol. 341-361.