

Cit this: *JOWSET*, **2018** (03), N°2, 335-341

Chemical and isotopic characterization of rainwater in the Berrechid basin, Morocco

El Ghali Tibari^{*1,2}, Qurtobi Mohamed¹, Marah Hamid¹, Raibi Fatima¹, El Mansouri Bouâbid²

^[1] National Center for Energy Sciences and Nuclear Techniques, BP. 1382 R.P. 10001, Rabat, Morocco

^[2] Laboratory of Geosciences / Natural Resources, Ibn Tofail University, BP. 133, Kénitra, Morocco

*Corresponding Author: Tel.: +212672801451; e-mail: elghali.tibari@gmail.com

A total of 41 rainwater samples were analyzed in order to define the chemical and isotopic input signature of the Berrechid aquifer, Morocco, during March-April 2013 and April 2014. Samples were analyzed for major anions (NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) and stable isotopes (^{18}O , ^2H). The chemical composition of rainwater is potentially influenced by the contribution of anthropogenic activities and sea spray. The computed meteoric water line ($\delta\text{D} = 7.78 \delta^{18}\text{O} + 10.09$; $r=0.94$) is consistent with that defined at Rabat station. The mean deuterium excess about 10.92‰ close to the value obtained for Atlantic precipitations confirms the oceanic origin identified by the air mass back trajectories. The altitudinal gradient defined as $-0.35\text{‰ d}^{18}\text{O}/100\text{m}$ is close to those defined in regional and national scale.

Received: 27 June 2018

Accepted: 7 August 2018

Available online: 8 August 2018

Keywords:

Rainwater

Chemical composition

Stable isotopes

1. Introduction

L'eau de pluie, élément essentiel du cycle hydrologique, joue un rôle important dans l'élimination des gaz et les particules solubles de l'atmosphère. La composition chimique des précipitations est influencée par les composés (gaz, gouttelettes, particules) émis dans l'atmosphère sous forme de gaz ou d'un aérosol solide ou liquide, à partir de sources naturelles (surface de la mer, zone désertiques, activités biogénique terrestre et marine,...) ou anthropiques [1]. Le lien avec les émissions liées aux activités anthropiques a été rapidement établi. En effet, les activités anthropiques (l'utilisation de combustibles fossiles et la production de biocides et de pesticides, les activités minières et le traitement inapproprié des effluents industriels) sont responsables de l'émission d'une grande variété de substances qui ont un effet acidifiant sur les sols et les eaux naturelles [2]. Ces substances comme les oxydes de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x) et l'acide chlorhydrique (HCl) restent dans l'atmosphère jusqu'au quelles soient retenus dans l'eau de pluie au cours de la

condensation de la vapeur d'eau sur les particules aérosols durant la formation des gouttelettes au sein du nuage (processus de Rainout), et/ou pendant la chute des gouttes de pluie à lors de l'incorporation des gaz entourant les gouttelettes, issus généralement d'un transport de longue distance (processus de Washout) [3-5]. Ces dernières interceptent et dissolvent les particules et les gaz au cours de leurs chutes. La composition de l'eau de pluie est directement liée au niveau des émissions locales, au transport des polluants, aux conditions climatiques et à la taille des gouttes. La composition isotopique des précipitations locales est principalement contrôlée par des processus à l'échelle régionale, comme l'origine et la trajectoire de la vapeur d'eau sur les continents et l'historique des précipitations moyennes des masses d'air donnant des précipitations à un endroit particulier [6]. D'autres facteurs déterminent la teneur isotopique d'un échantillon d'eau dont plusieurs sont étroitement corrélés à la température [7]: humidité atmosphérique (enrichissement en isotopes lourds avec diminution de l'humidité atmosphérique), latitude (diminution des isotopes lourds avec l'augmentation de la latitude), effet

de l'altitude (diminution des isotopes lourds avec l'élévation), l'effet continental (diminution des isotopes lourds avec l'augmentation de la distance de la mer), et l'effet saisonnier (les précipitations estivales sont enrichies en isotopes lourds par rapport aux précipitations hivernales) [8]. La composition chimique et isotopique des précipitations a déjà été étudiée dans de nombreux endroits du monde ([3] ; [9-11]; [12-15]). Ainsi, des observations systématiques de la composition chimique et isotopique des précipitations sont nécessaires pour étudier les changements et autres caractéristiques de la pollution pour surveiller l'impact sur les ressources en eau, en relation avec les changements climatiques observés et attendus.

L'objectif de ce travail est de définir la composition chimique (à savoir les majors anions (Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-}) et isotopique (isotope stables de l'eau ^{18}O et ^2H) du signal d'entrée de l'aquifère de Berrechid, principale source d'eau de la région.

2. Matériels et méthodes

1.2. Zone d'étude

La plaine de Berrechid, d'une superficie globale voisinant de 1500 km², est située au Sud de Casablanca et au Nord du plateau des Phosphates. Elle se présente sous forme d'une vaste cuvette insérée dans le quadrilatère formé par les villes de Settât, d'El Gara, Mediouna et le centre de Bouskoura (Fig. 1). Les altitudes varient de 350 m à la limite avec le plateau des Phosphates à 140 m au Nord de la plaine vers la Chaouia côtière. Les études géographiques et géologiques, ont montrés que l'alimentation de ce bassin ne peut se faire que par les infiltrations directes des précipitations, les infiltrations des eaux de ruissellement des Oueds arrivant des plateau des Phosphates et disparaissant sous la plaine et les apports souterrains latéraux [16-18]. La plaine de Berrechid est marquée par un climat semi-aride, la pluviométrie moyenne annuelle s'élève à 325 mm, avec une période pluvieuse qui s'étend du mois d'octobre au mois d'Avril. La température est modérée (19.04 °C en moyenne) et présente de forts écarts entre l'hiver et l'été avec une moyenne des maxima de 26.43 °C et des minima de 6.38 °C [17].

2.2. Collecte et analyse d'échantillons

Au cours de cette étude, 41 échantillons d'eau de pluie ont été récupérées durant les deux périodes Mars-Avril 2013 et Avril 2014 au niveau de 7 stations pluviométriques ; Tamdrost, El Haimer, Tamasna, Mazer, El Gara, l'Oued El Malleh et Melilla localisées dans la région plaine de Berrechid-plateau des Phosphates (Fig. 1). L'échantillonnage quotidien des précipitations est réalisé au moyen des pluviomètres. Les eaux de pluie sont collectées une fois par jour puis stockées dans des flacons en polyéthylène à double bouchons (100 ml), préalablement rincés à l'eau distillée. Les échantillons ont fait l'objet des analyses des isotopes stables de la molécule de l'eau (^{18}O et D) à l'aide de la spectrométrie de masse Delta Plus (IRMS) après équilibration à 18 °C. Les teneurs en ^2H et en ^{18}O

sont exprimées en unité (‰) par rapport au standard V-SMOW avec une incertitude de ± 0.1 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et ± 1 ‰ pour $\delta^2\text{H}$. Pour les échantillons dont la quantité été suffisante, des analyses en anions majeurs Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} ont été réalisées par chromatographie ionique en phase liquide Thermo ICS 5000 au Laboratoire de l'Analyse Structurale et Isotopique du CNESTEN. Le seuil de détection est de l'ordre de 0,1 $\mu\text{mol.l}^{-1}$. Parfois la quantité collectée durant les événements pluvieux n'était pas assez suffisante à l'analyse chimique par la technique de la chromatographie ionique, de ce fait, les eaux de pluie collectées pendant des événements proches ont été mélangées au laboratoire puis analysées.

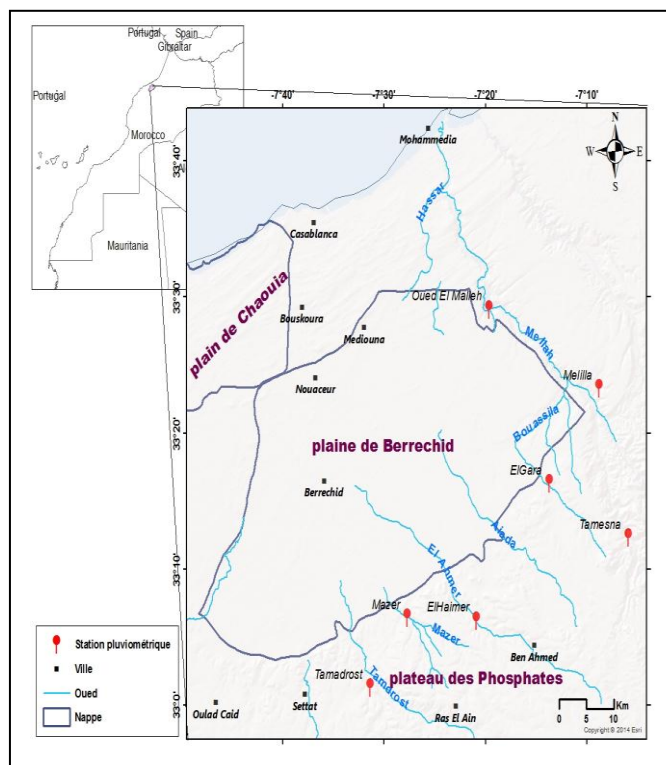


Fig. 1 : Carte de situation des stations pluviométriques dans la région plaine de Berrechid-plateau des Phosphates

3. Résultats et discussion

1.3. Origine des masses d'air

Pour observer les trajectoires des masses d'air durant 96 h avant leur arrivée sur le site d'étude et avant l'épisode pluvieux mesurée, les retro-trajectoires ont été générées en utilisant le modèle «NOAA/ARL Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Version 4» (HYSPPLIT4; [19]). Durant ces 96 h, la position de la masse d'air est calculée toutes les six heures et à trois niveaux altitudes différentes (500 m, 1500 m et 3000 m NGF). En considérant les régions traversées durant les 96 h précédant la collecte des pluies, trois principaux secteurs sont mis en évidence. Ces secteurs qui restent globalement atlantiques sont reportés sur la Figure 2

sur laquelle des trajectoires typiques issues de 3 épisodes pluvieux observés au cours des périodes d'étude (Mars, Avril 2013 et Avril 2014) sont illustrées.

- AO (Atlantique Ouest): dans ce secteur les masses proviennent principalement de l'Océan Atlantique.
- ANO (Atlantique Nord-Ouest): ce secteur concerne les masses d'air provenant du Nord-Ouest de l'Océan Atlantique avec seulement des masses d'air circulant à 500 m d'altitude qui traversent la terre émergée et la mer méditerranéenne avant d'atteindre la zone de prélèvement.
- ASO (Atlantique Sud-Ouest): les masses d'air issues de ce secteur sont également originaires de l'Océan Atlantique mais contrairement au secteur précédent, elles passent au-dessus des îles canariennes et le Sud-Ouest du Maroc avant d'atteindre la zone de prélèvement.

Ainsi, les retro-trajectoires des masses d'air montrent que la majorité des pluies précipitées sur le bassin de Berrechid proviennent essentiellement de l'Atlantique et sont influencées légèrement par les circulations Méditerranéennes.

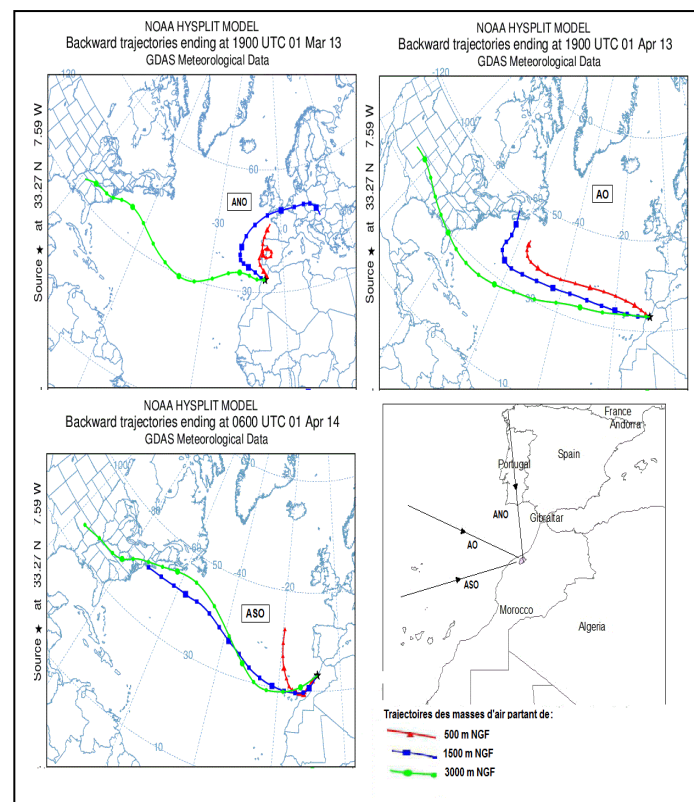


Fig. 2 : Retro-trajectoires typiques des masses d'air provenant des trois secteurs définis (ANO : 01/03/2013 ; AO : 01/04/2013 ; ASO : 01/04/2014)

2.3. Composition chimique des précipitations

La composition chimique de l'eau de pluie est directement liée à la composition de l'atmosphère dont elle est issue [20]. L'origine atlantique des masses d'air qui ont généré les eaux précipitées sur la zone d'étude souligne donc l'influence de l'Océan Atlantique pendant la formation des nuages.

Cependant, comme il a été mentionné précédemment la localisation géographique du bassin de Berrechid aux alentours des grandes zones industrielles des villes de Berrechid, Casablanca et Mohammedia, attribue aux activités anthropiques une importance non négligeable dans l'étude de la composition chimique des précipitations. La proximité de la région d'étude de l'océan atlantique permet de négliger l'influence terrigène, d'où, seules les anions « chlorures, sulfates et nitrates » sont analysées.

Les moyennes et les écarts types des concentrations en anions mesurés dans les précipitations durant la période de prélèvement sont affichés dans le Tableau 1.

Les éléments chimiques des pluies montrent une forte variabilité temporelle. Dans toutes les stations suivies, les pluies précipitées durant les premières averses du 03/03/13 au 06/03/2013 sont généralement plus concentrées que les pluies collectées durant le reste des événements. Ces pluies de forte concentration chimique sont celles générées par des masses d'air provenant du premier secteur Atlantique Nord-Ouest (ANO) (Fig. 2) Erreur ! Source du renvoi introuvable., et qui ont circulées au-dessus des zones urbaines tout en se chargeant des éléments rejetés dans l'atmosphère par les activités industrielles et par le trafic routier.

Les chlorures sont généralement les anions les plus dominants et qui montrent des écarts de variations très importants. Ces concentrations varient de $59.15 \mu\text{eq.l}^{-1}$ dans les pluies précipitées à la station Mazer, durant la période allant du 06/03/13 au 04/04/2013 et $1820.85 \mu\text{eq.l}^{-1}$ dans les échantillons de pluies précipitées à la station Oued El Maleh collectés du 04/03/13 au 06/03/2013.

Quant aux concentrations en sulfates, elles montrent des valeurs minimales dans les pluies collectées à la station d'El Haimier ($21.04 \mu\text{eq.l}^{-1}$) durant la période allant du 04/04/13 et 05/04/2013, et maximales ($563.33 \mu\text{eq.l}^{-1}$) dans les pluies de la station de l'Oued El Maleh, échantillonnées du 04/03/13 au 06/03/13.

Les concentrations en nitrates des pluies affichent leurs maximums dans les pluies collectées à la station Tamesna ($187.42 \mu\text{eq.l}^{-1}$) pendant l'événement pluvieux du 16/05/13 et leurs minimums ($4.68 \mu\text{eq.l}^{-1}$) dans les pluies recueillies à la station de l'Oued El Maleh durant la période du 04/03/13 au 06/03/13. Les fortes concentrations en nitrates des pluies de La station Oued El Maleh est due probablement à la proximité de cette station des zones industrielles des villes de Casablanca et de Mohammedia.

3.3. Origine des éléments chimiques responsables de l'acidité des eaux de la recharge

À l'exception de certains événements pluvieux qui présentent des concentrations plus au moins élevées par rapport aux normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), les eaux de pluie de la région d'étude sont dans leur globalité au regard des trois éléments analysés (Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-}) très minéralisées. Ceci peut être relié à l'influence des embruns marins sur les concentrations des Cl^- et SO_4^{2-} , et la forte

contribution des activités anthropiques sur le lessivage pendant la pluie par l'augmentation des gaz atmosphériques

adsorbés par les gouttelettes d'eau [21].

Tab 1: Composition chimique des pluies dans les stations Mazer, El Haimer, Tamesna, El Maleh, Tamadrost Melilla et El Gara

N°	Prélèvement	Date	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	nmSO ₄ ²⁻	nmSO ₄ ²⁻ / SO ₄ ²⁻	Rapport q
1	Mazer 1	03/03/13 - 06/03/13	112,96	55,48	69,38	53,56	0,77	0,51
2	Mazer 2	06/03/13 - 20/03/13	863,1	88,87	119,79	-	-	1
3	Mazer 3	06/03/13 - 04/04/13	59,15	17,58	37,5	29,22	0,78	0,38
4	Mazer 4	05/04/13 - 06/04/13	125,92	36,94	41,88	24,25	0,58	0,6
5	El Haimer 1	03/03/13 - 06/03/13	572,68	4,84	296,04	215,87	0,73	0,02
6	El Haimer 2	06/03/13 - 24/03/13	125,35	9,03	43,33	25,78	0,6	0,26
7	El Haimer 3	04/04/13 - 05/04/13	94,93	5,81	21,04	7,75	0,37	0,43
8	Tamesna 1	03/03/13 - 09/03/13	87,04	66,61	34,58	22,4	0,65	0,75
9	Tamesna 2	13/03/13 - 28/03/13	98,03	84,19	44,17	30,44	0,69	0,73
10	Tamesna 3	04/04/13 - 05/04/13	62,82	25,81	21,46	12,66	0,59	0,67
11	Tamesna 4	09/03/13 - 04/04/13	59,72	60,16	33,54	25,18	0,75	0,7
12	Tamesna 5	29/03/13 - 06/04/13	144,79	10	32,29	12,02	0,37	0,45
13	Tamesna 6	16/05/2013	468,45	187,42	269,38	203,79	0,76	0,48
14	El Maleh 1	03/03/13 - 06/03/13	1820,85	4,68	563,33	308,42	0,55	0,01
15	El Maleh 2	09/03/13 - 24/03/13	155,77	36,29	165,42	143,61	0,87	0,2
16	El Maleh 3	06/03/13 - 24/03/13	448,17	57,9	215	152,26	0,71	0,28
17	Tamadrost 1	04/03/13 - 06/03/13	154,08	26,13	35,42	13,84	0,39	0,65
18	Tamadrost 2	06/03/13 - 13/03/13	32,39	9,52	22,29	17,76	0,8	0,35
19	Tamadrost 3	05/04/2013	137,46	24,68	39,79	20,55	0,52	0,55
20	Melilla 1	04/03/2013	147,32	131,13	91,46	70,83	0,77	0,65
21	Melilla 2	06/03/2013	46,76	38,55	30,83	24,29	0,79	0,61
22	Melilla 3	10/03/13 - 24/03/13	82,82	70,81	58,54	46,95	0,8	0,6
23	ElGara	06/05/2013	95,49	122,26	40,83	27,46	0,67	0,82
Moyenne			260,69	51,07	101,18	64,69	0,63	0,51
Écart type			396,33	46,97	128,59	81,94		
Normes OMS			183	24	< 166			

La contribution des émissions due aux activités anthropiques des éléments tels que l'oxyde de soufre (SO₂), les oxyde d'azote (NO_x) et l'acide chlorhydrique (HCl) dans la composition chimique des pluies dans la plaine de Berrechid est maintenant prouvée scientifiquement. L'azote d'origine anthropique est émis principalement dans l'atmosphère par, la combustion d'énergie fossile, l'utilisation d'ammoniac dans l'agriculture comme fertilisants, l'élevage ou par la transformation microbienne des fertilisants azotés pendant les processus de nitrification et dénitrification [22]. Le soufre anthropique est émis dans l'atmosphère par la combustion des charbons et du fuel. Quant aux chlorures, elles ont deux sources principales d'une part l'impact des embruns marins et d'autre part l'activité humaine (incinération de matières plastiques) [10].

D'après Overrein et al. 1980 [23], la présence d'acide sulfurique (H₂SO₄), nitrique (HNO₃) et chlorhydrique (HCl) d'origine anthropique dans l'eau de pluie est susceptible d'engendrer une augmentation de l'acidité de la pluie qui est provoquée naturellement par le gaz carbonique dissout dans l'eau. Ce qui signifie que l'acidité notée dans les pluies de la

zone d'étude peut résulter d'une combinaison de fortes concentrations de Cl⁻, SO₄²⁻ et NO₃⁻, tandis que les faibles valeurs observées dans quelques prélèvements peuvent s'expliquer par le phénomène de neutralisation de ces ions par les cations basiques (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺...) [10].

Pour évaluer la contribution respective des ions analysés à l'acidité des pluies étudiées, le rapport « q » est calculé selon l'équation suivante :

$$q = [\text{NO}_3^-] / ([\text{NO}_3^-] + [\text{nm SO}_4^{2-}])$$

avec «nm» signifie l'origine non marine du sulfate dans les pluies, calculée en prenant comme référence l'ion chlorure dans l'absence de l'analyse de l'ion sodium par la relation suivante :

$$[\text{nm SO}_4^{2-}] = [\text{SO}_4^{2-}] - (0.14 * [\text{Cl}^-]) \quad [24]$$

La contribution marine pour l'élément NO₃ n'a pas été calculée parce que ce composé est en effet presque exclusivement d'origine anthropique et nullement d'origine marine [25]. La moyenne et l'écart type du q et le [nm SO₄²⁻] pour l'ensemble des échantillons collectés sont présentés dans le tableau 1.

Les valeurs calculées du rapport de la concentration du sulfate non marine [nmSO₄²⁻] par rapport à la concentration de sulfate

total, sont généralement très élevées dans presque la majorité des prélèvements (86.95%), et s'échelonnent entre 0.52 et 0.87 avec une moyenne de 0.63 et un écart type de 0.20. Ceci implique la faible contribution de la source marine à l'apport de sulfate aux eaux des précipitations, ce qui montre que ces sulfates proviennent majoritairement de la pollution anthropique.

Quant au rapport q , la valeur moyenne de 0.51 signifie que 51 % de l'acidité des eaux de la pluie est due aux nitrates et que 49 % est due aux sulfates. Cependant, le Tableau 1 montre que 43.47% des valeurs de q varient de 0.01 à 0.48, tandis que 56.52% des valeurs varient de 0.51 à 1, indiquant que le sulfate non marin peut être considéré comme le facteur dominant dans le contrôle de l'acidité de la pluie. Ce résultat implique une influence plus importante de l'acide sulfurique H_2SO_4 dans l'acidité de la pluie produit soit dans le système des nuages ou provoqué par des sources extérieures

4.3. Caractérisation isotopique

La caractérisation isotopique du signal d'entrée de l'aquifère de Berrechid est fondé sur les données des isotopes stables (^{18}O et 2H) de 41 échantillons de pluie hebdomadaires qui ont été prélevés aux stations météorologiques précédemment cités. Les pluies de faibles hauteurs ($H < 2$ mm) sont éliminées afin d'éviter le fractionnement isotopique lié à l'évaporation de l'échantillon entre l'événement de précipitation et le moment de l'échantillonnage. Le Tableau 2 résume les paramètres statistiques de la composition isotopique des eaux de pluie du bassin de Berrechid.

Tab 2 : Paramètres statistiques de la composition isotopique des eaux de pluie du bassin de Berrechid

Paramètre	Minimum	Maximum	Écart type	Moyenne
^{18}O (‰)	-5.97	-1.51	1.14	-3.83
2H (‰)	-35.55	-2.60	9.17	-19.69
d (‰)	6.87	15.05	2.23	10.92

Les teneurs en isotopes stables des pluies varient entre -5.97 et -1.51‰ pour l'oxygène-18 et entre -35.55 et -2.60 ‰ pour le deutérium avec respectivement les moyennes de -3.83‰ et -19.69 ‰. L'origine à l'ordonnée sur le diagramme « 2H vs ^{18}O » Fig.3, d (‰), exprimant l'excès en deutérium des eaux, est calculé selon la relation ($d = ^2H - 8 \cdot ^{18}O$) [26] varie de 6.87 à 15,05 ‰. La moyenne de « d » de 10.92 ‰ est très proche de celui obtenu pour des précipitations d'origine météorique qui est de $d=10$ ‰ [27]. Les valeurs supérieures à 10‰ indiquent la présence de faibles proportions de l'humidité lors de la formation des nuages sur l'océan, tandis que les valeurs faibles indiquent une évaporation de l'eau pendant la précipitation et/ou le prélèvement de l'échantillon. Par ailleurs, les valeurs excessives de deutérium légèrement élevées indiquent une contribution de la vapeur d'eau continentale recyclée et / ou de l'eau de surface évaporée dans la genèse des précipitations [28, 29].

5.3. Détermination de la Droite Météorique du Bassin de Berrechid

La détermination de la droite météorique locale (DML) pour les précipitations est une partie importante des études portées sur la détermination de l'origine des eaux souterraines. Cette droite constitue une référence très utiles pour la compréhension et le traçage de l'origine des eaux souterraines locales et de leurs déplacements [28].

La représentation graphique (Fig. 3) des teneurs isotopiques des pluies de la zone d'étude, et la régression linéaire obtenue de la relation $\delta^2H = f(\delta^{18}O)$, a permis de déterminer une droite météorique locale qui a pour l'équation suivante:

$$(DML) : \delta^2H = 7.78 \delta^{18}O + 10.09 \text{ avec } R^2 = 0.94$$

Cette droite qui caractérise une origine météorique des pluies au niveau du bassin de Berrechid, est très proche de la Droite Météorique Mondiale (DMM) ($\delta^2H = 8.17 \delta^{18}O + 10.35$, [7] et de la droite régionale ($\delta^2H = 7.34 \delta^{18}O + 10.19$) déterminée par Ouda et al. 2005 [30] à partir des mesures journalières des précipitations au niveau de la station de Rabat (située à 100 Km de Berrechid avec une altitude de 75 m).

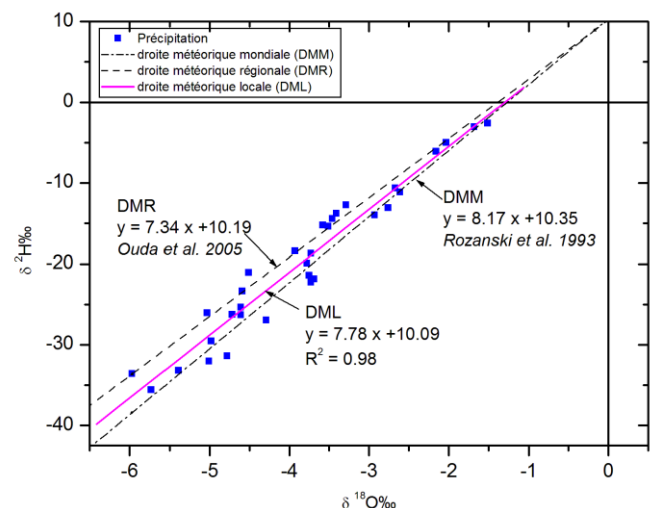


Fig. 3 : Relation $\delta^{18}O$ - δ^2H des eaux de pluies de la région plaine de Berrechid-plateau des Phosphates

6.3. Relation entre $\delta^{18}O$ et altitude

La composition isotopique des précipitations varie en fonction de l'altitude de prélèvement, les précipitations deviennent de plus en plus appauvries en ^{18}O et 2H lorsque l'altitude augmente [28]. Ceci a rendu possible une des applications les plus utiles en hydrologie isotopique, à savoir, identifier l'altitude des aires de recharge des eaux souterraines.

La variation des teneurs en ^{18}O des précipitations en fonction des altitudes de prélèvement pour les pluies du bassin de Berrechid a mis en évidence la relation suivante (Fig. 3):

$$\delta^{18}O = -0.0035 \cdot Z - 2.45 \text{ avec } R^2 = 0.79$$

ce qui signifie un gradient altitudinal de -0.35‰ par 100 m d'altitude. Ce gradient est proche de celui établie par Marcé

1975 [31] dans la chaîne atlasique au Maroc qui est de -0.3‰ ^{18}O par 100 m, et également proche de celui établie par Raibi et al. 2006 [32] dans le bassin versant de Tensift et qui est de l'ordre de -0.32‰ en ^{18}O par 100 m d'altitude, et semble relativement inférieur à celui de -0.25‰ par 100 m établi par Abourida 2007 [33] dans le bassin du Haouz et de -0.27‰ par 100 m établi par El Ouali et al. 2011 [34] au Moyen Atlas calcaire.

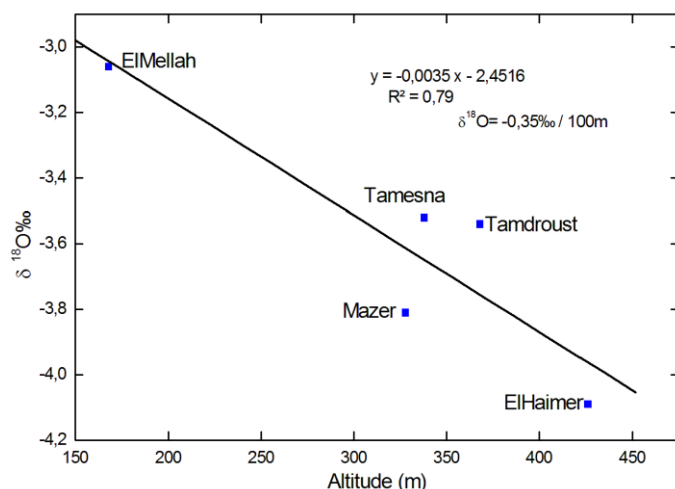


Fig. 4 : Variation du $\delta^{18}\text{O}$ des pluies en fonction des altitudes de prélèvement dans la zone d'étude (Gradient altitudinal)

4. Conclusions

Dans cette étude, la reconstitution des trajectoires des masses d'air générant les pluies sur le bassin de Berrechid, a permis de renseigner leurs origine atlantique et également l'influence des circulations méditerranéens. Outre, la caractérisation chimique des pluies au moyen des trois ions Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- a montré que l'acidité est fortement contrôlée par l'influence de l'activité anthropique qui est parfois associée au processus de neutralisation.

De même, La caractérisation isotopique de la fonction d'entrée a permis l'établissement de la droite météorique locale pour la zone d'étude qui d'une part fournit une base de comparaison pour les futures études des isotopes stables pour cette région, et d'autre part, représente un intérêt majeur dans la connaissance des caractéristiques des eaux de la recharge sur l'ensemble du bassin. Le gradient altitudinal déterminé constitue un outil très utile pour l'identification des zones de recharge dans la zone d'étude ainsi que pour l'évaluation les processus et les interactions hydrologiques qui se produisent pendant la recharge.

Acknowledgements

The authors acknowledge all people from CNESTEN and ABHBC who have aided in accomplishing of this work.

References and notes

1. N Das, R Das, G R Chaudhury, S N Das. *Atmospheric Research*. **2010**, 95 108-113.
2. M Radojevic, V Bashkin. *Practical environmental analysis*. **2007**.
3. H Celle. Caractérisation des précipitations sur le pourtour de la Méditerranée occidentale: Approche isotopique et chimique. Thèse, Université Avignon, **2000**
4. G Bertrand. De la pluie à l'eau souterraine. Apport du traçage naturel (ions majeurs, isotopes) à l'étude du fonctionnement des aquifères volcaniques.(Bassin d'Argnat, Auvergne, France). Thèse, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, **2009**
5. J Jaunat. Caractérisation des écoulements souterrains en milieu fissuré par approche couplée hydrologie-géochimie-hydrodynamisme: application au massif de l'Ursuya (Pays Basque, France). Thèse, Université Michel de Montaigne-Bordeaux III, **2012**
6. R Gonfiantini. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry; The Terrestrial Environment*. **1986**, 113-168.
7. K Rozanski, L Araguás-Araguás, R Gonfiantini. *Climate change in continental isotopic records*. **1993**, 1-36.
8. I.A.E.A. Stable isotope hydrology. **2001**, 39.
9. C Hontoria, A Saa, J Almorox, L Cuadra, A Sanchez, J Gasco. *Water, Air, and Soil Pollution*. **2003**, 146 35-54.
10. D Migliavacca, E Teixeira, F Wiegand, A Machado, J Sanchez. *Atmospheric Environment*. **2005**, 39 1829-1844.
11. I.A.E.A. Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate. **2005**, 1453 223.
12. O A Al-Khashman. *Atmospheric Research*. **2009**, 91 53-61.
13. B Ladouche, A Luc, D Nathalie. *Journal of Hydrology*. **2009**, 367 150-164.
14. H Celle-Jeanton, R Gonfiantini, Y Travi, B Sol. *Journal of Hydrology*. **2004**, 289 165-177.
15. A M Silva, V P Campos, R S Domingues, L P Cruz, F O Santana. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. **2017**, 28 2402-2411.
16. J Ruhad. Chaouia et plaine de Berrechid. Ressources en eau du Maroc. Notes et Mémoires du Service Géologique, . **1975**.
17. A.B.H.B.C. Etude du Plan Directeur d'Aménagement Intégré des ressources en eau du bassin hydraulique du Bouregreg

- et de la Chaouia. Missions I.2. Évaluation des ressources en eau et des écosystèmes aquatique. **2005**.
18. B El Mansouri. Structure et modélisation quantitative de l'aquifère de Berrechid. Validation par l'approche géostatistique. Thèse, Université des Sciences et Techniques de Lille, France, **1993**
 19. R Draxler, G Rolph. Dostupno na: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (06.06.2010.) 2003.
 20. C E Junge. *Air chemistry and radioactivity*. **1963**.
 21. A Hounslow. *Water quality data: analysis and interpretation*. **1995**.
 22. K Khalil. Emissions de N₂O par nitrification et dénitrification à l'échelle de la motte de sol: effet de la structure du sol, de l'aération et des activités microbiennes. Thèse, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, **2003**
 23. L N Overrein, H M Seip, A Tollan. *Acid precipitation-effects on forest and fish. Final report of the SNSF-project 1972-1980*. **1980**.
 24. W C Keene, A A Pszenny, J N Galloway, M E Hawley. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. **1986**, 91 6647-6658.
 25. X-F Huang, X Li, L-Y He, N Feng, M Hu, Y-W Niu, L-W Zeng. *Atmospheric Research*. **2010**, 97 185-193.
 26. W Dansgaard. *Tellus*. **1964**, 16 436-468.
 27. H Craig. *Science*. **1961**, 133 1702-1703.
 28. I Clark, P Fritz. *Environmental Isotopes in Hydrology* Lewis Publishers. **1997**.
 29. H Marah, F Taous, M Qurtobi, B Ouda, F Raibi. in *EGU General Assembly Conference Abstracts*. **2010**.
 30. O Ouda, A El Hamdaoui, M Ibn Majah. in *IAEA-TECDOC*. **2005**.
 31. A Marcé. *Rap. 75SGN447 LAB, BRGM, Orléans*. **1975**.
 32. F Raibi, A Benkaddour, L Hanich, A Chehbouni, M Chtioui. *GIRE3D, Marrakech, Maroc*. **2006**.
 33. A Abourida. Approche hydrogéologique de la nappe du Haouz (Maroc) par télédétection, isotopie, SIG et modélisation. Thèse, Université Cadi Ayyad **2007**
 34. A El Ouali, S Sefrioui, J Mudry, O F Fihri, A Essahlaoui, H Marah. in *H2Karst-9th Conference on Limestone Hydrogeology*. **2011**.