



Mémoire de Fin d'Etudes

Master Sciences et Techniques

Eau et Environnement



**Etude de l'évaporation et de l'évapotranspiration des eaux sous un
climat semi aride à l'aide de l'approche isotopique
(Cas du Haouz de Marrakech)**

Par :

SAID AHMED SAID

Soutenu le 30 juin 2011 devant la commission d'examen composée de :

AMENZOU N.	(CNESTEN- Rabat)	Encadrant
RAIBI F.	(CNESTEN- Rabat)	Encadrant
BENKADDOUR A.	(FST-G - Marrakech)	Encadrant
IGMOULLAN B.	(FST-G - Marrakech)	Examineur
SAIDI M.	(FST-G - Marrakech)	Examineur

2010/2011

REMERCIEMENT

Qu'il me soit permis de présenter ici mes remerciements à tout un petit monde de personne qui ont rendu possible la présente étude et qui ont contribué à son élaboration .

J'adresse tout d'abord mes remerciements les plus sincères à **Mr H . MARAH** , chef de l'unité « Eau et climat » au CNESTEN, qui a très volontiers accepté d'être le promoteur de ce projet. Sa grande connaissance dans le domaine, ainsi que son expérience, ont joué un rôle important dans la conception de ce travail.

Je remercie tous particulièrement **Mademoiselle F.RAIBI** chercheur au laboratoire central CNESTEN, module « Eau et Climat », qui malgré les prérogatives qui sont siennes, a accepté sans réserve d'orienter ce travail. Merci encore à elle pour ses efforts approuvés dans l'accomplissement de la tâche qui nous a été confiée, ses conseils, sa présence permanente et sa vigilance par rapport à la progression du travail.

Que **Mr N.AMENZOU** reçoit l'expression de ma reconnaissance pour tout son dynamisme et ses compétences scientifiques qui m'ont permis de mener à bien cette étude, en plus de sa disposition .Il s'est grandement impliqué par ses directives, ses remarques et suggestions, mais aussi par ses encouragements dans les moments clés de son élaboration.

La sollicitude du **Pr. BENKEDDOUR**, professeur à la faculté de sciences et techniques de Marrakech m'a profondément touché. Sa recommandation et son judicieux concours dans les différentes étapes du projet ont contribué grandement à l'élaboration du travail.

Je suis très sensible à la présence des membres du jury **B. IGMOUILLAN** et **M.SAIDI** qui ont accepté, sans aucune réserve, d'évaluer ce travail et de me faire part de leurs remarques si pertinentes, qui ont contribué au perfectionnement du present travail.

Mes remerciement s'étendent également à tous mes professeurs du Master « Eau et Environnement » qui se reconnaissent ici ainsi que mes collègues du master.

Que **Mr. FOUAD** et **Mme SOILIHA**, trouvent ici ma reconnaissance sur tous les ce qu'elles m'ont apporté comme soutien dans l'élaboration de cette réalisation.

J'associe très volontiers le staff de l'unité 'Eau et Climat » , avec qui j'ai partagé pendant ces deux mois, de discussions fructueuses et des moments de détente.

Je souhaite aussi remercier **Mr Elhad KASSIM** et toute la maisonnée de la ville hôte en particulier lors de ce séjour à Kenitra pour leur accueil chaleureux.

Enfin, j'en reviens à ma famille, à ma mère celle qui est toujours présente et continue de l'être pour faire mon bonheur. Un grand merci à mon père pour s'être sacrifié pour que tes enfants grandissent et prospèrent. Merci aussi à ma sœur **Hikma** d'être toujours là à mes cotés par ton assistance et ton amour.

Que tout ce monde trouve ici un mot de reconnaissance et que chacun se reconnaisse en ce qui le concerne.

AVANT PROPOS

Ce projet de fin d'étude est destiné à rendre compte du travail réalisé en tant que stagiaire du 02 Mai au 02 Juillet 2011 au centre nucléaire CNESTEN de Maamoura.

Il s'agit d'un projet s'inscrivant dans le cadre d'un partenariat entre IAEA, le CNESTEN et l'Université cadi Ayyad.

Ce travail est basé sur la quantification de l'évaporation et de la transpiration dans le continuum sol-plante-atmosphère en utilisant les isotopes stables de la molécule d'eau. Pour mener bien à cette étude, des campagnes d'échantillonnages ont été menées en 2010 pour récolter le maximum de données sur le site d'étude situé dans la région du Haouz Marrakech.

Ce travail a bénéficié le support du programme « sol plante » que le CNESTEN et du soutien de l'AIEA, qui ont mis la science nucléaire au profit pour améliorer les techniques de production végétale et la protection de l'environnement, particulièrement dans les régions arides et semi-arides.

RESUME

Le Haouz est une des régions arides et semi-arides qui souffre d'une pénurie d'eau due entre autre à la rareté des précipitations et à une demande en eau sans cesse croissante sous l'effet de la pression de la démographie et de l'activité agricole.

L'évapotranspiration constitue le facteur de perte le plus important, dont la détermination est capitale pour une gestion maîtrisée de la ressource en eau. Les méthodes classiques proposées restent insuffisantes (micro-lysimètre, flux de sève) pour déterminer correctement la partition du flux d'évapotranspiration, faute de données disponibles. Notre étude consiste à utiliser la géochimie isotopique qui fournit des informations utiles pour mener à bien cette partition et à mieux comprendre les processus d'extraction d'eau par les racines des plantes.

En effet, l'évaporation du sol conduit à une augmentation de la teneur en isotopes stables lourds de l'eau dans le sol. Par contre, l'extraction de l'eau dans les racines et au niveau des feuilles garde le même signal isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ et le δD) en absence de tout phénomène de fractionnement.

L'eau des précipitations est rapidement perdue dans la zone racinaire d'une part par transpiration végétale et d'autre part par évaporation du sol. Cette perte dépend de la quantité d'eau fournie aux plantes et de la physiologie de la végétation.

La technique du keeling plot et le modèle de Craig & Gordon nous a permis de séparer les composants: évaporation et transpiration dans l'évapotranspiration, durant les deux jours d'échantillonnage respectivement 16 et 17 juillet.

Les résultats obtenus durant ces deux jours ont montré d'une part que la contribution de la transpiration dans l'évapotranspiration totale est de 100% le premier jour et de 96% le deuxième jour.

Mots clés : Evaporation, transpiration, évapotranspiration, régions semi-aride, irrigation, fractionnement isotopiques, approche isotopique, $\delta^{18}\text{O}$ et le δD , keeling plot.

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENT.....	I
AVANT PROPOS.....	II
RESUME.....	III
Liste des tableaux	7
Liste des figures.....	8
Liste des abréviations	9
INTRODUCTION	10
Chapitre 1 Objectifs et déroulement du stage	12
1) L'organisme d'accueil: CNESTEN.....	12
2) Présentation de Module Applications dans les sciences de la terre et de l'environnement (DASTE).....	13
3) Contexte général de la zone d'étude.....	13
4) Objectif et déroulement su stage	14
Chapitre 2 Utilisation des isotopes du milieu en hydrologie.....	15
1) Rappel sur les isotopes de la molécule d'eau	15
2) Rapport et abondance isotopiques.....	15
3) Fractionnement isotopique.....	16
4) Analyse des isotopes stables « spectromètre de masse »	17
4.1) Spectromètre de masse ((FINNIGAN DELTA PLUS piloté par le logiciel ISODAT)).....	17
4.2) Spectromètre laser (LGR inc).....	19
5) Application des isotopes stables.....	19
5.1) Hydrologie	19
5.3) Archéologie	20
5.4) Agriculture.....	20
Chapitre 3 Matériels et méthodes	25
1) Situation du site d'étude.....	25
1.1) Description de la zone d'étude (Agafay)	25
1.2) Climat	26
1.3) Géologie.....	26
1.4) Hydrogéologie	27
2) Echantillonnage.....	29
2.1) Sol.....	29
2.2) Vapeur atmosphérique	30
2.3) Plante	30
2.4) Eau souterraines et eaux de surfaces.....	30

3) Laboratoire (Extraction de l'eau et analyses isotopiques).....	31
3.1) Vérification et enregistrement des échantillons	31
3.2) Système d'extraction sous vide de l'eau	31
3.3) Analyse des isotopes stables de l'eau	32
Chapitre 4 Résultats et discussions.....	35
1) Relation entre oxygène-18 ($\delta^{18}\text{O}$) et deutérium (δD) des différentes eaux	35
2) Composition isotopique des Profils de sol.....	37
3) Séparation E et T (méthode Keeling plot).....	38
3-1) Calcul de δET	38
3-2) Calcul de la composition isotopique du flux d'évaporation du sol δE (Craig et Gordon 1965).....	39
CONCLUSION	42
PERSPECTIVES	43
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	44

Liste des tableaux

Tableau 1 : Isotopes de la molécule d'eau	15
Tableau 2 : Référence internationales utilisées pour l'analyse isotopique.....	18
Tableau 3 : Standards isotopiques	34
Tableau 4 : Paramètre utilises pour estimer la composition isotopique du flux d'évaporation selon le model (δE) Craig-Gordon	40
Tableau 5 : La contribution de chaque composante (évaporation et transpiration) dans le flux d'évapotranspiration total.....	41

Liste des figures

Figure 1 : Les isotopes de l'hydrogène	15
Figure 2 : Spectromètre de masse isotopique (d'après Deléens et al., 1997).....	18
Figure 3 : Schéma de la Présentation optique du spectromètre laser	19
Figure 4 : Cycle du Nitrogène	21
Figure 5 : Composition isotopique d'eau dans le continuum sol plante atmosphère.....	22
Figure 6 : Traçages des précipitations en oxygène-18(d'après Dansgaard, 1964, In Fontes, 1976).....	23
Figure 7 : Situation de la zone d'étude.....	26
Figure 8 : Échantillonnage du sol sur le site d'Agafay	29
Figure 9 : les hauteurs de l'échantillonnage de la vapeur atmosphérique.....	30
Figure 10 : Système d'extraction de l'eau du sol et de la plante.....	31
Figure 11 : Le système d'équilibration	32
Figure 12 : Schéma de principe d'équilibration d'un échantillon	33
Figure 13 : Comparaison de la composition en $\delta^{18}\text{O}$ et δD dans la zone non saturée avec celle des eaux de précipitation, de surface et eaux souterraines	36
Figure 14 : Détermination de la Line local d'évaporation	37
Figure 15 : Profiles de ($\delta^{18}\text{O}$) dans le sol	38
Figure 16 : Keelng plot $\delta^{18}\text{O}$ en fonction de $1/[\text{H}^2\text{O}]$	39

Liste des abréviations

CNESTEN : Centre national de l'énergie, des Sciences et techniques nucléaires

D : Deuterium

E: Evaporation

ETP : Evapotranspiration

LEL : Ligne locale d'évaporation

LMM: Ligne météorique mondiale

SMOW : SMOW Standard Mean Ocean Water: unités des isotopes des eaux de mer

T : Tritium

T: Transpiration

INTRODUCTION

Sous climat semi-aride ou aride, l'eau du sol tend à montrer un profil caractéristique de teneurs en deutérium et oxygène 18.

La quantification de l'évaporation d'un sol contenant de l'eau, dans des conditions de flux permanent ou quasi-permanent, à l'échelle locale tient compte des différents paramètres du sol (porosité, humidité, végétation etc.), ainsi que des variations de composition isotopique en profondeur (Barnes & Allison, 1967).

La plaine de Haouz est caractérisée par une topographie plane et monotone qui s'étend sur une largeur de 150 Km d'Est en Ouest. Un bassin sédimentaire recouvert par d'abondantes formations détritiques continentales et fluviales, issues du démantèlement des chaînes atlasiques.

Parmi les techniques qui répondent le mieux à nos besoins, l'approche isotopique qui constitue un outil de mesure efficace, pratique et non onéreux (N.ZINE et al.,)

C'est ainsi que le CNESTEN mettra la science nucléaire au profit pour améliorer les techniques de production végétale et la protection de l'environnement, particulièrement dans les régions arides et semi-arides par le programme « sol plante ». Ce dernier mettra au point et transférera des techniques faisant appel à des isotopes stables et radioactifs pour l'étude de la croissance et des besoins en éléments nutritifs des cultures afin d'accroître le rendement, tout en conservant l'eau et empêchant les terres marginales de se dégrader d'avantage.

Les isotopes stables du carbone, de l'oxygène et de l'hydrogène permettent à la fois de suivre le trajet de l'eau du sol à l'atmosphère mais aussi d'évaluer avec quelle efficacité la plante utilise cette ressource.

L'objectif de la mission était de comprendre et maîtriser les phénomènes d'évaporations et d'évapotranspiration des eaux sous un climat aride dans le but de contribuer à l'amélioration des techniques d'irrigation.

Dans la plaine du Haouz, l'irrigation se fait sous un climat aride. Elle engendre une énorme consommation en terme de quantité d'eau alors que les ressources hydriques sont limitées compte tenu des nombreuses fluctuations liées au changement climatique et à la croissance démographique.

La maîtrise de la connaissance et de l'évaluation de la ressource en eau est donc indispensable pour une prise de décision adéquate et une gestion durable de cette ressource.

La stratégie adoptée dans notre étude consiste à utiliser l'approche isotopique de la molécule d'eau; Cette technique est devenue un instrument de travail complémentaire et dans certains cas, indispensable pour l'hydrologue qui cherche à répondre aux besoins croissants en eau de l'agriculture, de l'industrie et des collectivités.

La mission qui nous a été confiée consistait à évaluer les pertes par évapotranspiration et séparer entre les deux composantes Evaporation et transpiration sur une culture d'orange irriguée goutte à goutte.

C'est dans ce contexte bien précis que notre étude s'inscrit dans la problématique suivante : Comment quantifier les pertes d'eau dans le continuum sol-plante- atmosphère dans la région du Haouz sous un climat semi-aride?

Dans le premier chapitre nous présentons une vue des travaux antérieurs sur l'utilisation des isotopes stables de la molécule d'eau. Le deuxième chapitre traite les méthodes utilisées dans le site étudié avec la description des différents dispositifs expérimentaux permettant l'acquisition des données durant ces expériences. Puis dans le troisième chapitre, on discutera en deux parties les résultats obtenus. La première partie rapporte l'évolution de la composition isotopique des eaux dans le continuum sol-plante-atmosphère et la deuxième partie des résultats étudie la séparation de l'évaporation et de la transpiration par la méthode de Keeling plot. Enfin, une conclusion sur l'efficacité de la technique isotopique par rapport à d'autres techniques est présentée.

Chapitre 1 Objectifs et déroulement du stage

1) L'organisme d'accueil: CNESTEN

Le Centre d'Etude Nucléaire de la Maâmora est situé à 22 km au Nord-Est de Rabat et à 15 km au Sud-Ouest de Kenitra dans la forêt de la Maâmora. C'est un complexe technologique abritant un réacteur de recherche et un ensemble de modules scientifiques et techniques comprenant :

- LSV : Application dans les Sciences du Vivant
- LIAIRI : Instrumentation et Applications Industrielles des Rayonnements Ionisants
- LASTE : Application dans les Sciences de la Terre et de l'Environnement
- SRPE : Sûreté Radiologique et Protection de l'Environnement
- GDR : Gestion des Déchets Radioactifs
- Module Réacteur
- Centre de Formation
- Centre d'Information et de Documentation

Le CNESTEN est un établissement public à caractère scientifique, technique, industriel et commercial, placé sous la tutelle du Ministère De l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'environnement et administré par un conseil d'Administration présidé par le Premier Ministre. Ses principales missions sont :

- ▶ Promouvoir la recherche scientifique et les applications des techniques nucléaires dans les différents secteurs socio-économiques du pays : médecine, industrie, environnement, agriculture, hydrologie etc...
- ▶ Préparer les bases technologiques nécessaires à l'introduction de l'électronucléaire : technologie des réacteurs, cycle du combustible, sûreté nucléaire.
- ▶ Constituer l'outil technique de l'Etat en matière de sûreté et sécurité radiologique.

2) Présentation de Module Applications dans les sciences de la terre et de l'environnement (DASTE).

Ce Module est dédié aux analyses élémentaires, radio métriques et isotopiques, permettra :

- ↗ Grâce à son spectromètre de masse, l'application des techniques isotopiques à la détermination de l'origine, de l'âge et du taux de recharge des eaux souterraines ;
- ↗ Par la méthode de fluorescence X, le dosage des terres rares, des métaux lourds et du soufre dans l'air et de la plupart des éléments chimiques (de l'aluminium jusqu'à l'uranium) dans diverses matrices ainsi que l'étude, la caractérisation géochimique et la cartographie de la pollution (dosage des polluants dans les eaux, les sédiments, les sols, les échantillons biologiques) ;
- ↗ L'analyse des radioéléments naturels et artificiels dans différents types d'échantillons ;
- ↗ L'étude de l'érosion des sols et de la sédimentation dans les réservoirs d'eau en utilisant le ^{137}Cs et le ^{210}Pb ;
- ↗ L'étude de la pollution radioactive dans le milieu marin ;
- ↗ La datation en géologie et archéologie ;
- ↗ L'analyse de ^3H et ^{14}C dans l'eau pour l'application en hydrologie.

3) Contexte général de la zone d'étude

Le sud du Maroc est une zone où l'eau est rare. L'alimentation des périmètres irrigués situés autour de la ville de Marrakech et de la ville elle-même se fait grâce à deux barrages situés dans l'Atlas.

Tandis que l'accroissement démographique très fort de la ville nécessite toujours plus d'eau (non seulement pour l'alimentation en eau mais aussi pour les périmètres irrigués qui face à ce marché qui grandit- s'étendent), les ressources en eau vont en diminuant sous l'effet des changements environnementaux. C'est donc vers une optimisation de la gestion de l'eau qu'il faut tendre.

Notre travail faisait l'objet de l'intégration de l'approche isotopique dans cette zone de production du Haouz.

L'objectif qui sous-tend l'intégralité de ce manuscrit est la contribution à la séparation de l'évaporation de la transpiration afin de déterminer les pertes d'eau d'irrigation par évaporation.

4) Objectif et déroulement du stage

Le stage avait pour objectif de dresser un bilan de flux du système sol-plante et identifier les techniques d'irrigation, en relation avec la réglementation nationale en la matière. Le déroulement du stage s'est articulé autour de quatre phases distinctes :

Phase 1 : Campagne d'échantillonnages et analyses au laboratoire (RAIBI F., AMENZOU N.) ;

Phase 2 : Exploitation des données reçues ;

Phase 3 : Identification de la quantité d'eau perdue à différents niveaux par évaporation et évapotranspiration ;

Phase 4 : En perspective on propose des modèles mathématiques adaptables sur les différents types de techniques d'irrigations en agriculture et sur la réglementation marocaine en la matière.

Chapitre 2 Utilisation des isotopes du milieu en hydrologie

1) Rappel sur les isotopes de la molécule d'eau

On appelle isotopes deux atomes qui ont le même numéro atomique (même nombre de protons) mais des nombres de masse différents (nombre de neutrons différents).

La molécule d'eau est composée essentiellement de deux atomes d'hydrogènes et un atome d'oxygène. Ainsi, l'hydrogène possède plusieurs isotopes (voir Figure 1).

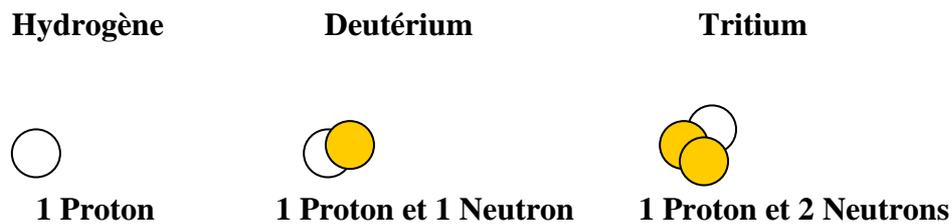


Figure 1 : les isotopes de l'hydrogène

Tableau 1 : Isotopes de la molécule d'eau

Elément	Isotopes	Abondances moyennes en %	propriétés
Hydrogène	^1H	99,985	Stable
	^2H :deuterium(D)	0,015	Stable
	^3H tritium(T)	10^{-18}	Radioactif(T=12,3 ans)
Oxygène	^{16}O	99,76	Stable
	^{17}O	0,04	Stable
	^{18}O	0,2	Stable

2) Rapport et abondance isotopiques

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

• **Le rapport isotopique R**, est égal au quotient du nombre d'isotopes lourds sur le nombre d'isotopes légers d'un élément donné : $R = \text{Lourd}/\text{léger}$. A titre d'exemple le rapport isotopique du carbone 13 est défini par : $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$.

• **L'abondance 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 isotopiques » ; $A = \text{Lourd}/(\text{Lourd} + \text{léger})$. Par exemple, l'abondance isotopique du carbone 13 est $A = {}^{13}\text{C}/({}^{13}\text{C} + {}^{12}\text{C})$.

Ces deux paramètres A et R, sont variable d'un composé à l'autre. Cependant, leur valeur peut être difficile à manier, car on observe des faibles variations sur des faibles quantités. Une réalité physique, qu'on préfère exprimé en un troisième paramètre relative, appelé **déviaton isotopique δ** , définie comme suit : $\delta(\text{‰}) = 1000 * (R_{\text{rech}} - R_{\text{ref}}) / R_{\text{ref}}$

Où R_{ech} et R_{ref} 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 appareils de mesure et entre laboratoires.

3) Fractionnement isotopique.

Le rapport d'isotopie stable (par exemple le rapport ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$) peuvent varier ou changer dans la nature sous l'effet des processus chimiques et biologiques, ce phénomène est appelé fractionnement isotopiques.

Par exemple les isotopes stable de l'oxygène des eaux de pluies se « fractionnent » spatialement à travers les continents sous l'effet des facteurs météoriques bien connus comme la température, quantité d'eau et le facteur comme l'altitude et la distance de la mer.

Ce rapport d'isotopes légers présent dans les animaux, roches, l'eau et les végétaux varient selon la position géographique dans le monde et cela permet souvent aux chercheurs d'utiliser les isotopes comme traceurs d'origine.

De façon simple, le « fractionnement isotopique » correspond à la répartition des isotopes d'un élément. De façon précise, le fractionnement exprime une répartition de deux groupes d'isotopes selon qu'ils soient « léger » ou « lourd ». 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 (tels ^{16}O).

Dans tous les cas, ces variations sont très faibles mais mesurables. Un fractionnement isotopique correspond soit à un enrichissement soit à un appauvrissement d'un composé ou d'une matière donnée en un isotope par rapport à une référence (standard).

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 isotopiques** du carbone lors de la photosynthèse.

4) Analyse des isotopes stables « spectromètre de masse »

4.1) Spectromètre de masse ((FINNIGAN DELTA PLUS piloté par le logiciel ISODAT))

Le spectromètre de masse mesure le rapport isotopique ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) du gaz pur (CO_2 , N_2 , O_2) et le compare à celui d'un gaz de référence (étalonné par rapport au standard international voir Tableau2)

Le gaz pur (gaz échantillon ou gaz de référence) est introduit dans la « source » de SMI où il est « bombardé » par les électrons. Le gaz ainsi ionisé est chargé positivement. Il est accéléré et projeté sous forme d'un faisceau et projeté sous forme d'un faisceau très fin dans un champ magnétique dont les ions sont déviés sur les trajectoires circulaires en fonction de leurs masses.

Les ions ainsi séparés arrivent dans 3 collecteurs réglés pour collecter les masses 44, 45 et 46 pour le CO_2 ou les masses 28, 29 et 30 pour le N_2 et masses 32, 33, et 34 pour le O_2 . Un amplificateur relié aux collecteurs permet d'amplifier les signaux électriques qui

dépendent de la quantité d'ions collectés. Ces signaux sont transmis à un ordinateur où ces données sont analysées et les rapports de masses isotopiques ($45/44$ et $46/44$ pour le CO_2 , $29/28$ et $30/28$ pour le N_2 et $33/32$ et $34/32$ pour le O_2) sont déterminés et comparés à ceux du gaz de référence (voir figure numéro de la figure 2).

La précision de mesure est de $0,2\text{‰}$.

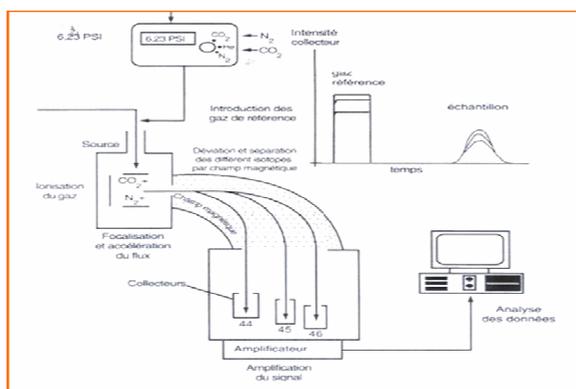
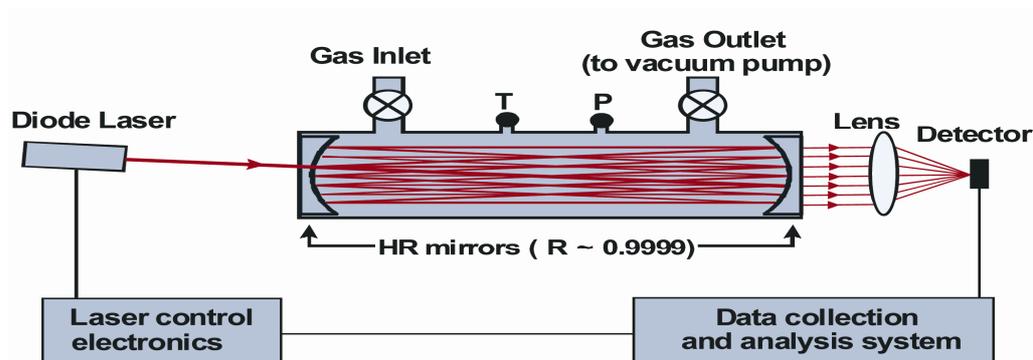


Figure 2 : Spectromètre de masse isotopique (d'après Deléens et al., 1997)

Tableau 2 : Référence internationales utilisées pour l'analyse isotopique

Element	Référence	Origine	A(ppm)	R(ppm)
Carbone	PDB(Pee Dee Belemnite)	Calcaire de la caroline du sud (USA)	11123,3	11237,2 ($\pm 2,9$)
Hydrogène	V.SMOW(Vienna Standard Mean Ocean Water)	Mélange d'eaux océanique	155,74	155,76 ($\pm 0,05$)
Azote	Gaz azote	Azote atmosphérique	3663	3676,5 ($\pm 8,1$)
Oxygène	V.SMOW(Vienna Standard Mean Ocean Water)	Mélange d'eaux océaniques	2001,2	2005,2 ($\pm 0,43$)

4.2) Spectromètre laser (LGR inc)



Figure

3 : Schéma de la Présentation optique du spectromètre laser

Ce spectromètre optique mesure les deltas $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et delta D/H dans l'eau.

L'analyse est basée sur la loi de Beer-Lambert : un nano-échantillon d'eau est vaporisé sur le trajet du faisceau laser et les interférences créées sont proportionnelles aux rapports isotopiques de l'échantillon. Le spectromètre laser permet d'analyser des échantillons ayant un volume qui peut atteindre 100 μL . La précision sur les mesures est de $\pm 1\%$ pour delta D/H et $\pm 0,2 \%$ pour delta $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. La capacité de cette machine est de plus de 2000 échantillons par an.

5) Application des isotopes stables

Une grande partie de l'hydrosphère (l'eau) et de la biosphère (le végétaux et les animaux) est constituée de plusieurs éléments clés, lesquels comprennent l'hydrogène (H), l'oxygène(O), l'azote (N), le carbone (C) ainsi que leurs isotopes stables . Les modèles de fractionnement isotopique (au niveau de leur abondance naturelle) sont maintenant “ incontournableement ” complémentaires des modèles de fonctionnement physiologique et métabolique des plantes et hydrologique.

5.1) Hydrologie

En hydrologie, l'application isotopique permet de : Connaitre la profondeur de circulation des eaux, évaluer le taux de mélange des eaux, localiser des aires de recharges, faire une reconstitution paléo-climatique des températures, localiser les sources de pollutions et déterminer la nature des polluants.

5.2) Pharmacologie et nutrition

Les analyses isotopiques ont plusieurs applications dans ce domaine, elles sont utilisées pour le contrôle de la qualité des produits pour la répression des fraudes et la caractérisation de l'authenticité des huiles essentielles.

De nombreux travaux sont effectués dans ce domaine à titre d'exemple, les analyses de parfums, des vins, des miels, des jus de fruits et des huiles végétales (W.Meir-Augenstein et al.,2004 ; W.Band et al 1996) ; W.Meir-Augenstein et al 1999)

5.3) Archéologie

L'analyse isotopique est utilisée pour obtenir des informations sur l'alimentation des préhistoires et leurs modes de vie à partir des restes organiques conservés dans les objets archéologiques (W.Meier-Augustin et al., 2004 ;Meier-Augustin et al.,1999 ;J.A Tripp et al.,2004)

5.4) Agriculture

Les éléments principaux des composés biologiques (C, N, O, H ...) existent sous plusieurs formes isotopiques et en proportions telles qu'il est possible d'en mesurer la qualité de manière précises.

C'est le cas des éléments comme le carbone (^{13}C : 1,1% du ^{12}C + ^{13}C), l'azote (^{15}N : 0,36% du ^{14}N + ^{15}N), l'oxygène (^{18}O : 0,2 % et ^{17}O : 0,04% du ^{16}O + ^{17}O + ^{18}O) et de l'hydrogène (0,015% du H + D). Nous illustrerons dans le présent rapport les principales applications des isotopes dans l'étude de la relation sol plante.

a) Fertilisation et irrigation Exemple du cycle du Nitrogène

Bien que l'azote ne représente que 3 % de la matière végétale, l'azote est la quatrième constituant des plantes qui est utilisé dans l'élaboration de la molécule indispensables comme les protéines, les nucléotides, les acides nucléiques et la chlorophylle (Epstein, 1972). Les êtres vivant ont développé différentes stratégies pour subvenir à leurs besoins en azote.

La plupart des végétaux, bactéries, levures, champignons ou algues assimilent l'azote sous forme minéral, moléculaire (N_2) NO_3 ou NH_4 dans le sol. Les animaux ne peuvent l'assimiler que sous formes organiques (protéines, acides animés etc...).

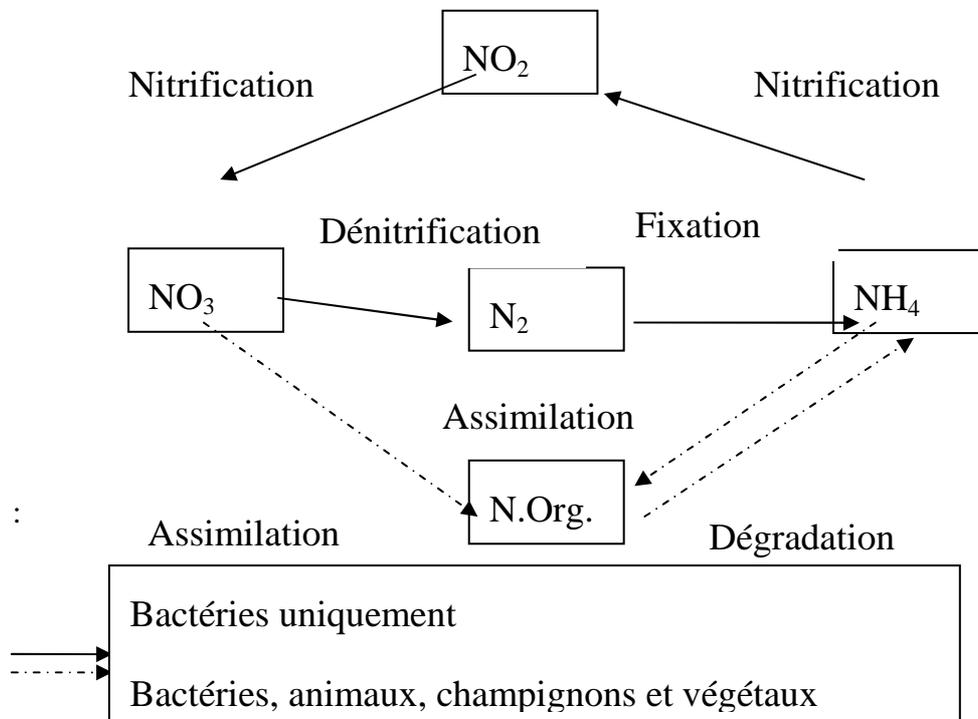


Figure 4 : Cycle du Nitrogène

Les études concernant la nutrition azotée des plantes ont largement bénéficié des approches reposant sur l'utilisation des isotopes stable ¹⁵N (pour accroître la production agricole) ont fait largement appel aux engrais azotés. Or, nombreux d'entre eux sont préjudiciables à l'environnement et polluent les réserves d'eau s'ils sont utilisés de façon excessive ou à mauvais escient. Les techniques nucléaires utilisent l'isotope stable ¹⁵N comme traceur permettant de prédire sous quelle forme, à quel endroit et à quel moment faut-il appliquer les engrais azotés.

b) Isotopes stables de l'eau (18O et deutérium) : exemple sur l'évapotranspiration

Les analyses des isotopes stables de H et de O ont amélioré la compréhension de la source d'acquisition d'eau par les plantes (voir figure 5). Les isotopes stables de l'eau constituent un traceur environnemental du cheminement de l'eau à travers les différents compartiments de son cycle.

Ils permettent des reconstitutions synoptiques indispensables aux études des variabilités climatiques, et hydrologique et des ressources en eau. En utilisant les teneurs du deutérium et de l' ^{18}O , il est facile de suivre l'eau dans le continuum sol plante atmosphère, puisque il n'y a pas de fractionnement isotopiques durant l'absorption par les racines.

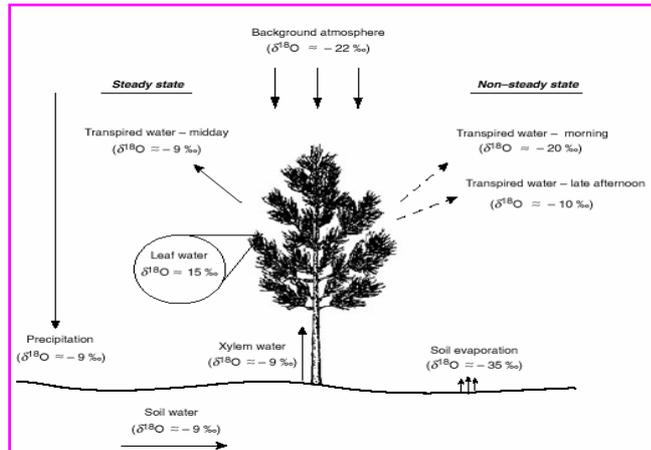


Figure 5 : Composition isotopique d'eau dans le continuum sol plante atmosphère

Les éléments les plus importants du bilan hydrique dans les zones semi-arides sont l'évapotranspiration et la percolation profonde. L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la quantité d'eau prélevée sur une nappe libre par évaporation et transpiration du couvert végétal non limitée par la disposition en eau du sol.

Outre, l'ETP en milieu semi-aride représente une composante majoritaire du cycle hydrologique (Hernandez, 2000). Pilgrim et al. (1988) rapportent que l'évapotranspiration recycle 80% des précipitations en milieu semi aride et 95% en région aride. L'évaporation du sol nu a souvent un poids supérieur à la transpiration des plantes du fait de la large portion de sol nu et d'une couverture végétale souvent discontinue et peu abondante. L'évapotranspiration joue donc un rôle majeur et ne peut pas être négligée sous ce type de climat.

Lors d'un événement pluvieux, l'atmosphère s'appauvrit en isotopes lourds, la vapeur restante ne donnera de nouvelles précipitations que si la température s'abaisse (ou si la pression augmente). Le réservoir atmosphérique sera alors un appauvri en isotopes lourds, et les précipitations formées à partir d'une vapeur appauvrie seront-elles-mêmes moins enrichies en isotopes lourds que celles du premier épisode pluvieux. La composition isotopique des eaux de pluies et de températures de condensation sont donc liées.

Le traçage des précipitations est donc possible et comme nous le verrons, celui de la vapeur d'eau atmosphérique l'est aussi. A titre indicatif, le graphique de la figure 6 Montre d'après Dansgaard (1964) in Fontes (1976) les variations de la composition isotopiques moyenne des précipitations en ^{18}O en fonction de la température annuelle moyenne au sol, c'est-à-dire grossièrement en fonction de la latitude.

Des résultats similaires existent pour la latitude, la saison, voire des périodes paléoclimatiques.

Les relations entre ces paramètres proposés par Dansgaard(1964) sont les suivantes :

$$\delta^{18}\text{O}=(0,69T - 13,6)\% \text{ et } \delta^2\text{H}=(5,6T-100)\%$$

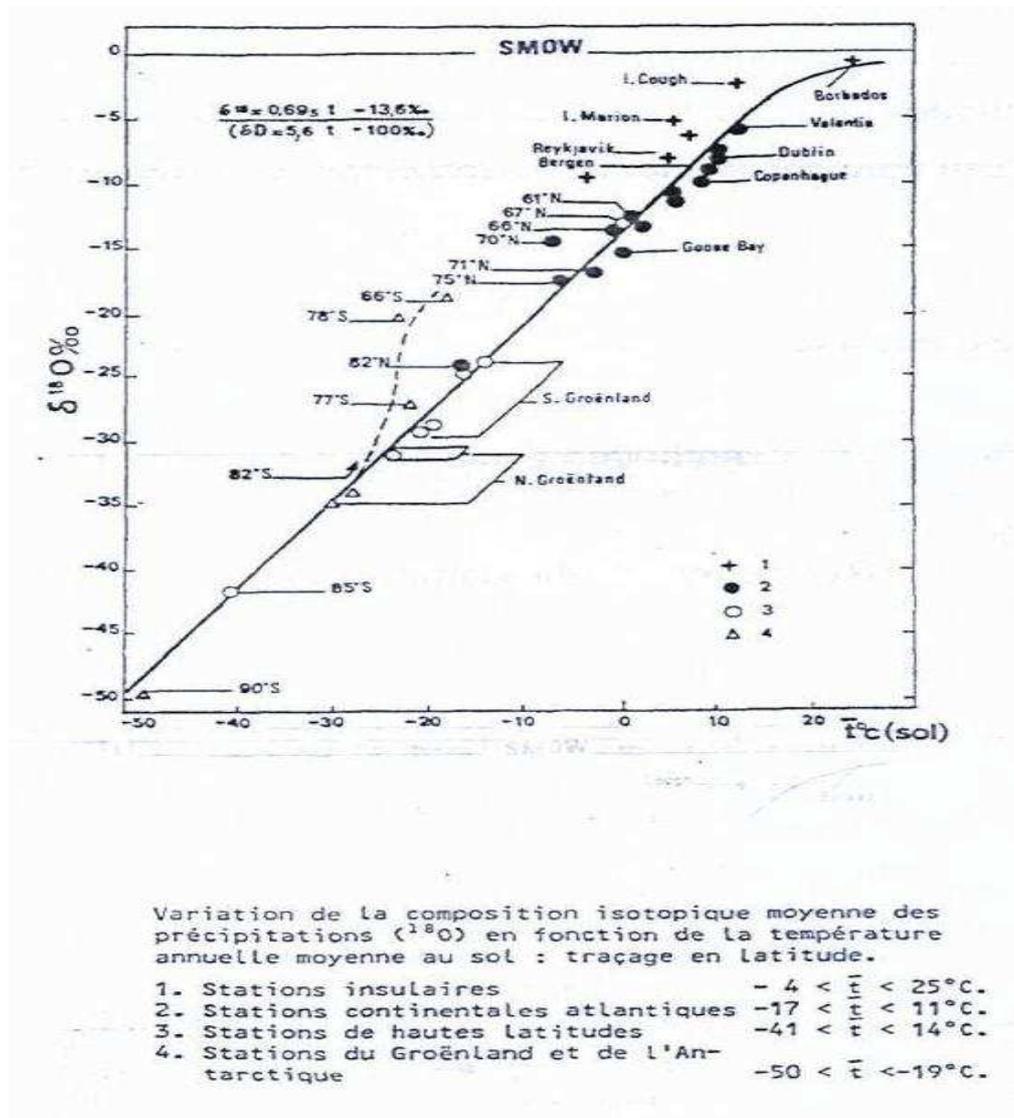


Figure 6 : Traçage des précipitations en oxygène-18(d'après Dansgaard, 1964, In Fontes, 1976)

La condensation étant une réaction à l'équilibre, le fractionnement isotopique qui intervient lors de la formation des précipitations est un fractionnement à l'équilibre, les deux isotopes stables de l'eau ayant alors le même comportement, il a été établit une relation entre les teneurs en ^2H et ^{18}O dans les précipitations (Craig, 1961) : $\delta^2\text{H}=8 \delta^{18}\text{O}+10$

Relation valable que pour les stations où l'on est assuré que les précipitations n'ont pas subi d'évaporation pendant les épisodes pluvieux. Sinon l'ordonnée à l'origine varie.

Une fois parvenu au sol et dans l'horizon superficiel du sol, les précipitations subissent une évaporation qui peut encore modifier leur signature initiale. A partir d'une certaine profondeur, la composition ne varie que faiblement sous la dépendance de la température ou par mélange avec d'autres eaux, avant de rejoindre la nappe. Les différents horizons du sol vont donc se trouver « marqués » par la signature de l'eau qui s'y trouve.

Chapitre 3 Matériels et méthodes

Introduction

Rappelons brièvement la description de l'expérience qui a été réalisée dans la deuxième année du projet « Quantification of hydrological fluxes in irrigated lands: optimization of isotopic techniques in Morocco» (RAIBI F. et AMENZOU N., 2008) et du travail effectué jusqu'à présent. L'expérience a été mise en place site à l'oranger du site d'Agafay situé dans le Haouz ordinaire dans le centre du bassin du Tensift , à 40km de l'Ouest de la ville de Marrakech.

Le site d'Agafay est un oranger verger irrigué par goutte à goutte. La hauteur moyenne des arbres était de 3 m environ, avec l'écartement des rangs de 1m. Le site a été maintenu dans des bonnes conditions d'arrosage à proximité de chaque arbre. Le site a été équipé d'une station météorologiques Pour l'humidité du sol des réflectomètres (CS616, Campbell Scientific Ltd) ont été installés à des profondeurs de 5, 10, 20, 30, 40, 60 et 80 cm.

Les précipitations ont été mesurées au moyen d'un pluviomètre. Les mesures ont été prises à 1 Hz, et les moyennes enregistrées aux intervalles de 30 min sur les enregistreurs de données CR23X (Campbell Scientific Ltd).

1) Situation du site d'étude

1.1) Description de la zone d'étude (Agafay)

Le site d'étude : Agafay se situe dans la plaine du Haouz de Marrakech qui s'étend, à l'intérieur du Maroc, sur environ 4 000 km² entre le 31^{ème} et le 32^{ème} degré de la latitude Nord. Elle est encaissée entre la chaîne de l'Atlas au Sud, les Jbilet au Nord, le Moyen Atlas à l'Est et les collines de Mzoudia à l'Ouest.

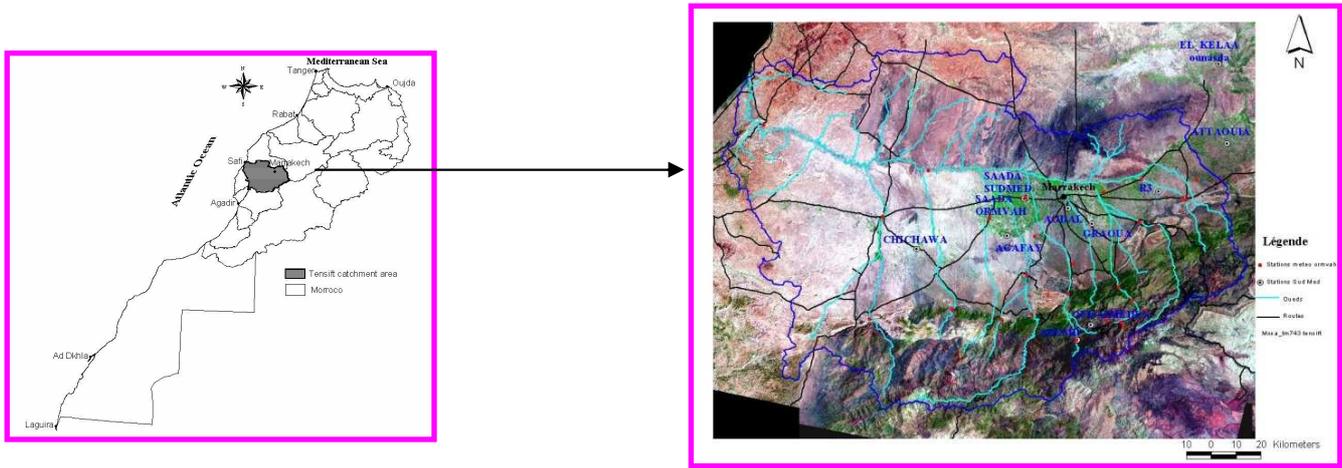


Figure 7 : Situation de la zone d'étude

Les eaux d'étiage et une partie des eaux de crues alimentent des séguias servant à l'irrigation dans la plaine du Haouz. Une autre partie s'infiltré ou s'évapore. La plus grande partie des eaux de crues quitte le Haouz par l'oued Tensift ou par la trouée de l'oued Tessaout dans les Jbilet.

1.2) Climat

Le climat est typiquement méditerranéen semi-aride, les précipitations tombent surtout en hiver et au printemps (environ 75% du total des précipitations annuelles), dès le début de Novembre jusqu'à la fin avril, avec une moyenne allant de 192 à 253mm par an.

L'atmosphère est très sèche avec une moyenne humidité de 56% et la demande d'évaporation est très élevé (1600 mm par an), dépassant largement le rapport annuel des précipitations.

1.3) Géologie

a) La plaine du Haouz

Entre l'Atlas et les Jbilet le socle primaire a été arasé pendant le Secondaire et déformé par les premiers mouvements atlasiques. Les mouvements tectoniques tertiaires ont provoqué un fossé entre l'Atlas et les Jbilet par suite d'un jeu de fractures et de flexures.

Pendant la surrection de l'Atlas, à l'Oligo-Miocène et au Pliocène, les oueds ont accumulé les produits de démantèlement de la chaîne dans ce fossé, noyant les principales lignes architecturales.

La composition des débris accumulés est déterminée par la constitution des montagnes d'où venaient les oueds. Ceux-ci ont étalé leurs alluvions par déplacement latéral de leurs cours dans une dépression peu profonde transformée en zone d'épandage.

Leurs dépôts devenaient de plus en plus récents vers l'aval. Les plissements atlasiques et les remblaiements successifs se sont terminés au Pliocène supérieur. Il s'est produit depuis une succession de cycles d'érosion fluviale.

Les oueds atlasiques ont remanié les formations du Pliocène supérieur, les ont brassées avec de nouveaux apports ;

Au cours de périodes humides, ils ont, en se déplaçant, étalé à leur arrivée dans la plaine des galets et des cailloutis pour former les cônes de déjections actuels cependant qu'à l'aval ils déposaient dans les marécages des limons roses.

b) L'Atlas

L'Atlas est une chaîne de montagne plissée et faillée qui a été ensuite plus ou moins érodée. La partie montagneuse élevée qui constitue la zone axiale est dépourvue de couverture mésozoïque ; elle est formée de roches anciennes, le plus souvent métamorphiques ou éruptives, d'âge Primaire ou Précambrien.

Lorsque la couverture secondaire est conservée sur le versant dominant la plaine du Haouz il s'agit en général de formations continentales et lagunaires rouges souvent salifères, d'âge Permo-Triasique, Jurassique ou Crétacé.

Sur le versant atlasique dominant la plaine du Haouz les affleurements de formations calcaires sont relativement réduits. Il s'agit essentiellement de calcaires du Lias localisés dans la partie orientale.

1.4) Hydrogéologie

Le réseau hydrographique comprend deux systèmes :

- Dans le système occidental l'oued Tensift coule d'E en W dans la plaine du Haouz au pied des Jbilet, Il reçoit comme un collecteur les oueds N'fis, Reraya, et Ourika qui descendent du versant Nord de l'Atlas.

- Dans le système oriental l'oued Tessaout et son affluent l'oued Lakhdar descendent du versant Nord de l'Atlas et quittent le Haouz par une trouée dans les Jbilet pour aller rejoindre l'Oued Oum Er Rbia.

a) Sur le versant atlasique dominant la plaine

Les formations anciennes, métamorphiques ou éruptives sont imperméables et se délitent peu. Les eaux ayant ruisselé sur ces formations donnent peu de débits solides. Les formations continentales et lagunaires rouges sont imperméables ou très peu perméables mais se délitent très facilement. Les eaux ayant ruisselé sur ces formations ont des débits solides élevés.

Les formations calcaires sont perméables en grand et résistantes. Les eaux s'y infiltrent en partie en période pluvieuse et en ressortent sous forme de sources permanentes. Seul le bassin de l'Oued Lakhdar, dans la partie orientale, en renferme des affleurements importants; c'est ce qui explique le caractère pérenne de cet oued. Les eaux qui ont ruisselé sur ces formations ont des débits solides faibles.

b) Dans la plaine du Haouz

Par suite de l'absence des formations calcaires du Secondaire ou du Tertiaire il n'existe pas de nappes profondes sous l'ensemble de la plaine. Seules les formations continentales de remplissage renferment une nappe importante et généralisée : la nappe phréatique.

Mais ces formations continentales sont très hétérogènes et de perméabilité très variable. La perméabilité moyenne diminue à mesure que l'on s'enfonce, les faciès devenant de plus en plus argileux.

La nappe phréatique circule pratiquement dans la partie supérieure du remplissage continental, c'est-à-dire dans les formations du Pliocène et du Quaternaire remaniées par les oueds atlasiques. Cette couche utile a une épaisseur moyenne de 40 mètres. Cette tranche utile est elle même hétérogène dans le sens vertical et dans le sens latéral.

On observe des chenaux correspondant à d'anciens lits d'oueds et constitués par des formations à galets, graviers et sables où la perméabilité est plus forte et qui sont le siège d'écoulements préférentiels.

La couverture limoneuse de la plaine limite considérablement l'alimentation verticale par les infiltrations d'eau de pluie ou d'eau d'irrigation. L'alimentation de la nappe phréatique provient

essentiellement de l'infiltration des eaux de crues des oueds selon leurs cours, principalement sur les cônes de déjection.

La nappe circule du Sud vers le N.O. ou le Nord, c'est-à-dire de l'Atlas vers l'Oued Tensift ou vers les trouées de l'Oued Tessaout et de l'oued Gaino dans les Jbilet.

Les exutoires naturels de la nappe sont constitués par les underflows des oueds Tensift au Nord et par les résurgences ou sources de la rive gauche de l'oued Tensift à l'Ouest.

2) Echantillonnage

Au cours des missions d'échantillonnages des échantillons d'eau du sol, des plantes, de la vapeur atmosphérique et des eaux des différents compartiments ont été collectées selon des procédures qu'on détaille ci-dessous

2.1) Sol

L'échantillonnage du profil du sol est effectué par un prélèvement d'une carotte de 80 Cm, tout en suivant les instructions suivantes (Figure 8).

1. Choisir un lieu qui représentant en évitant les bords et la partie ombrée.
2. Ne pas endommager une grande surface de la terre;
3. Maintenir le profil vertical;
4. Couper immédiatement le profil après extraction, en vertu d'une zone d'ombre pour éviter tout phénomène évaporation ;
5. Conserver les échantillons dans la boîte fermée et conserver les dans un réfrigérateur.

Les profils ont une longueur de 60 à 80 cm ont été coupés tous les 5cm.



Figure 8 : Échantillonnage du sol sur le site d'Agafay

2.2) Vapeur atmosphérique

L'échantillonnage de la vapeur dans l'atmosphère se fait par une ligne de verre, le dispositif de la ligne est comme suit : une pompe, un débitmètre, tuyaux, filtres, pièges de verre et de Dewar pour le carboglace. Au même temps les jauges d'humidité et de température ont été installées sur les mêmes niveaux qui sont liés à une boîte d'acquisition pour l'enregistrement de ces paramètres à chaque 15 minutes pendant la période d'échantillonnage de la vapeur atmosphérique. Après la collecte, les échantillons ont été conservés dans des flacons étanches avec une température de 18 ° C afin d'éviter tout fractionnement par évaporation (Figure 9).

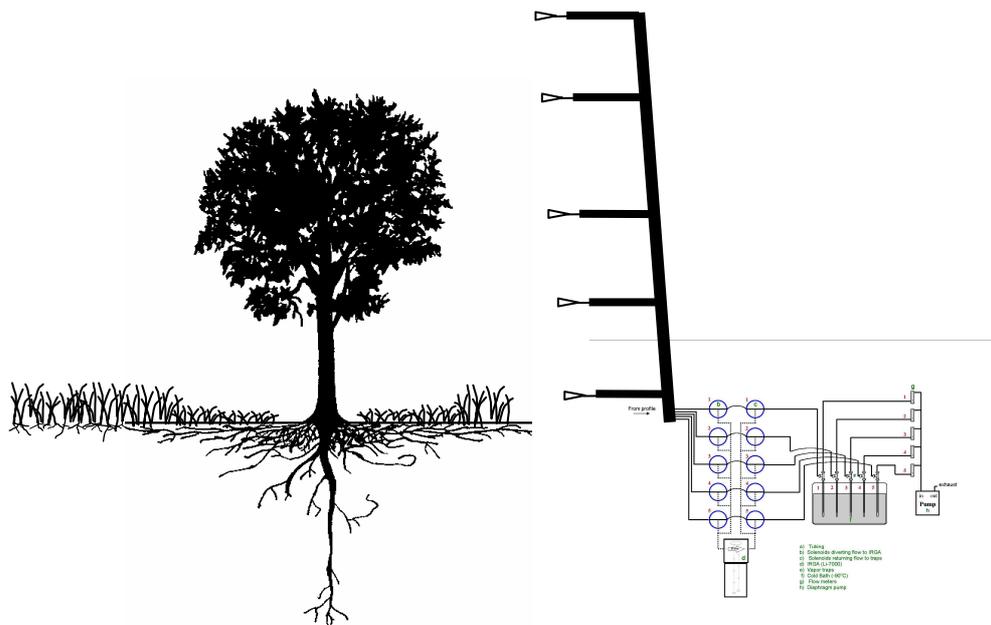


Figure 9 : Les hauteurs de l'échantillonnage de la vapeur atmosphérique

2.3) Plante

Les tiges des plantes seront collectées sans feuilles ni fruits ; Une fois au laboratoire, l'eau de la tige sera extraite par distillation sous vide.

2.4) Eau souterraines et eaux de surfaces

L'échantillonnage de ces eaux est effectué de façon manuelle en suivant les instructions suivantes:

1 / pompage de l'eau stagnante afin d'obtenir représentant l'eau de l'aquifère étudié dans le cas des eaux souterraines;

2 / Rinçage l'ensemble des bouteilles d'eau à échantillonner;

3 / Echantillonnage de 30 ml d'eau dans des bouteilles en polyéthylène, pour analyse isotopique.

Dans le même temps les échantillons de pluie et des eaux souterraines ont été recueillis sur le site d'étude.

3) Laboratoire (Extraction de l'eau et analyses isotopiques)

3.1) Vérification et enregistrement des échantillons

Après la campagne d'échantillonnage sur le terrain, les échantillons reçus au laboratoire sont vérifiés, étiquetés puis enregistrés avec précautions dans avant de les éditer dans le laboratoire approprié (spécifique) pour chaque échantillon.

3.2) Système d'extraction sous vide de l'eau

Au laboratoire de l'eau du sol est extraite par distillation sous vide ; Deux échantillons de sol sont extraits chaque jour, pendant 2 heures à 100 ° C (Figure 10).

L'extraction se fait par réchauffement des échantillons jusqu'à vaporisation de l'eau ensuite cette eau est piégé par des pièges d'Azote liquide, ensuite l'eau est récupéré dans des flacons spécifique pour les analyses isotopique par spectromètre laser.

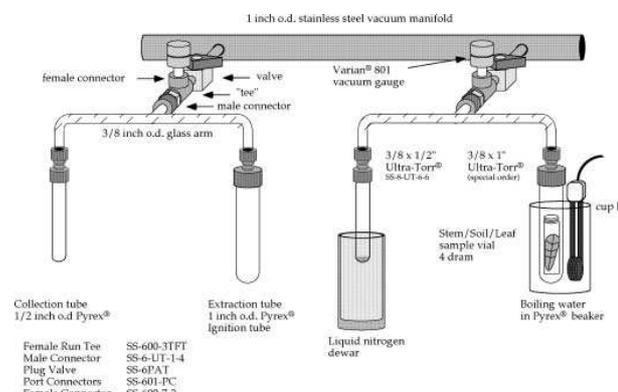


Figure 10 : Système d'extraction de l'eau du sol et de la plante

3.3) Analyse des isotopes stables de l'eau

Une fois à laboratoire les échantillons de l'eau d'irrigation, de surface et des eaux souterraines sont analysés par spectromètre de masse selon la procédure décrite ci-dessous, alors que les échantillons de faible quantité extraite de l'atmosphère, du sol et de la plante sont analysés par spectromètre laser.

La conservation des échantillons revêt d'une importance capitale. Une petite exposition à l'air peut en effet conduire à l'évaporation de l'eau, modifiant ainsi sa teneur isotopique. Les échantillons sont donc conservés dans des bouteilles bien fermées et à température ambiante.

a- Analyse par spectromètre de masse

L'appareillage est composé d'un système d'équilibration et du spectromètre de masse.

L'analyse passe par trois étapes :

- **Introduction des échantillons** dans le système d'équilibration qui est composé de trois bancs de huit positions d'où la possibilité d'analyser 24 échantillons dont six est des standards internes du laboratoire.



Figure 11 : Le système d'équilibration

Sur chaque banc, deux standards différents sont analysés permettant ainsi d'avoir une indication sur la performance de chaque banc mais surtout de révéler de possibles fluctuations électroniques du spectromètre de masse.

- Equilibration des échantillons

3 ml d'échantillon d'eau sont mis en équilibre isotopique avec le dioxyde de carbone ou l'hydrogène selon le gaz que l'on désire étudier à une pression de l'ordre de 500mbar. La prise d'essai est versée dans le fond du flacon d'équilibration (en évitant de mettre des gouttes

sur le bord) avec une barre de platine qui joue le rôle de catalyseur. L'opération est identique pour les standards.

Les échantillons sont introduits dans un bain à 18°C contenant suffisamment d'eau pour que la partie inférieure des flacons soit immergée. Les flacons subissent une agitation de 80tr/min.

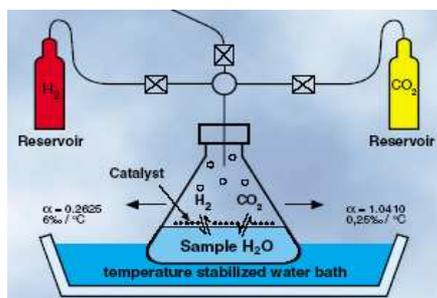
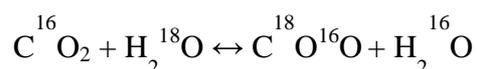


Figure 12 : Schéma de principe d'équilibration d'un échantillon

Les concentrations en oxygène-18 et en deutérium reflètent alors celles de l'eau mesurée par le spectromètre de masse.

L'équilibre s'effectue habituellement en deux heures environ. Le rapport isotopique du gaz hydrogène reflète ainsi celui de l'échantillon d'eau.

La détermination du rapport isotopique de l'oxygène se fait grâce à la réaction d'équilibre suivante entre le CO₂ et l'eau qui dure habituellement six heures environ :



- **Les mesures** : La ligne d'introduction de gaz est tout d'abord purgée par pompage. Le gaz obtenu après équilibration est injecté dans le spectromètre de masse pour être analysé. Avant toute mesure, il convient de s'assurer que le piège à eau du système d'équilibration est bien à une température de l'ordre de -70°C à -80°C. Cette température est atteinte à l'aide d'un cryoplongeur dont la canne est immergée dans un thermo contenant l'éthanol.

La phase finale est la récupération des résultats : Le spectromètre de masse permet de mesurer des rapports isotopiques absolus. Par contre la justesse de la mesure est toujours insuffisante en raison des fluctuations de l'électronique de mesure. On compare donc un échantillon à une référence. La différence observée entre l'échantillon et la référence sera donc toujours la

même puisque les fluctuations instrumentales ayant affectées l'échantillon sont les mêmes pour la référence.

Afin de contrôler la performance des différentes positions des bancs du système d'équilibration, la position des standards sera modifiée pour chaque analyse.

Le laboratoire dispose de deux standards internes : LS1 qui est une eau de mer distillée à maintes reprises et LS3, qui est une eau relativement appauvrie provenant d'une source au Maroc.

Les résultats obtenus sont exprimés en valeur δ par rapport au standard de travail (WS). Les résultats des deux standards internes utilisés (LS1 et LS3) sont contrôlés pour déterminer leur valeur moyenne et ainsi calculer la valeur du δ de l'échantillon par rapport au VSMOW. Les valeurs δ des standards internes doivent correspondre aux valeurs issues de la calibration à 0.1‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et 1‰ pour δD . Les valeurs n'étant pas dans cette fourchette sont exclues du calcul de la moyenne.

Tableau 3 : Standards isotopiques

Standards	$\delta\text{ D [‰]}$	$\delta^{18}\text{ O [‰]}$
LS1	-2,1	-0,24
LS3	-41,6	-7,565

Chapitre 4 Résultats et discussions

1) Relation entre oxygène-18 ($\delta^{18}\text{O}$) et deutérium (δD) des différentes eaux

Afin d'avoir une idée sur la corrélation entre l'oxygène-18 et le deutérium pour différentes eaux comprenant la vapeur atmosphérique, eau de pluie, eaux de surface et les eaux souterraines, nous présentons sur la figure 13 la relation entre le $\delta^{18}\text{O}$ et le δD . En analysant cette figure, on remarque que tous les échantillons sont situés le long de la LML. En plus on note que la vapeur atmosphérique est plus appauvrie en terme de $\delta^{18}\text{O}$ et de δD comparé aux eaux souterraines, à l'eau de surface, à l'eau de sol, à l'eau d'irrigation et aux eaux précipitations.

La régression linéaire entre les compositions isotopiques des trois profils (P1, P2 et P3) a rapporté une pente de près de 4 ; Ceci est comparé aux résultats rapportés dans d'autres études similaires (Gibson 2002)

En analysant la composition isotopique de chaque profil séparément et de sa position comparée au LML, on note que l'eau du profil 2 est évaporée avec une pente de 4,81 ($4,8128x - 12,068$, $R^2 = 0,6275$), suivis de l'eau du profil 1 avec une pente de 3,95 ($3,9562x - 16,703$, $R^2 = 0,6216$), et finalement on trouve l'évolution de l'eau du profil 3 selon une pente de 3,37 ($3,3718x - 21,326$, $R^2 = 0,844$).

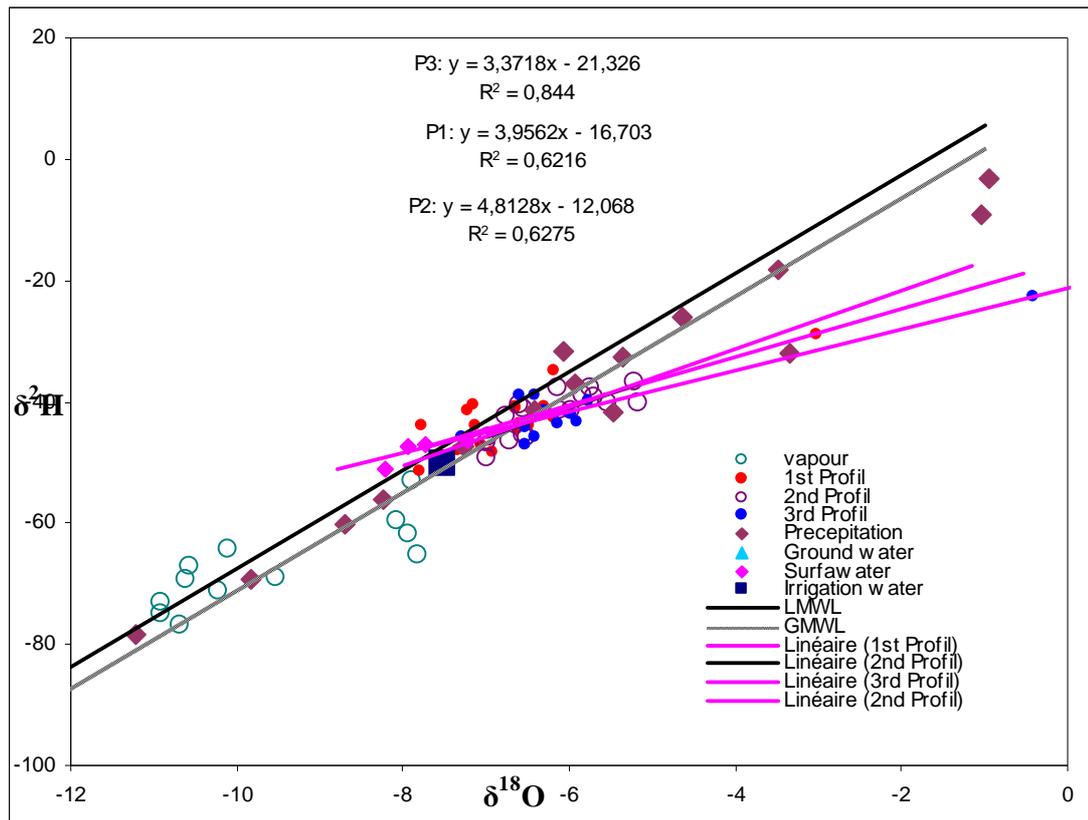


Figure 13 : Comparaison de la composition en $\delta^{18}O$ et δD dans la zone non saturée avec celle des eaux de précipitation, de surface et eaux souterraines

Après comparaison de compositions isotopiques des trois profils séparément par rapport à LML, ces échantillons ont été combinés afin de déterminer la ligne locale d'évaporation (LLE) pour notre zone d'étude. La figure 13 et la figure 14 représentent la comparaison de l'oxygène-18 et du deutérium pour tous les échantillons des trois profils. Le point d'intersection de LLE et LML correspond à la composition 6.6‰ pour le $\delta^{18}O$ et 50,6 ‰ pour le δD . Ce point correspond approximativement à la zone où l'eau de surface venant du barrage local d'irrigation constitue un mélange d'eaux souterraine et de l'eau venant du barrage Takerkoust. Ce barrage fournit l'eau d'irrigation pour toutes les terres irriguées dans le secteur. Par conséquent on peut conclure ainsi que l'origine de l'eau stockée dans le sol est une eau venant du barrage local d'irrigation seulement.

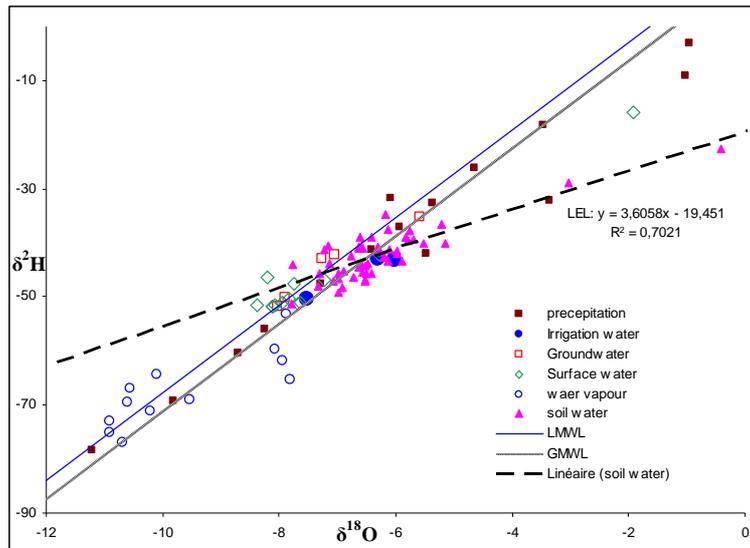


Figure 14 : Détermination de la Line local d'évaporation

2) Composition isotopique des Profils de sol

Afin de déterminer le front d'évaporation avant, pendant et après l'irrigation, on a reporté sur ce diagramme la composition en ($\delta^{18}\text{O}$) pour les trois profils P1, P2 et P3 en fonction du δD sur la figure 15 en plus de la composition isotopique de l'eau d'irrigation. En analysant cette figure, on conclut que le comportement observé des profils P1 et P3 correspond plus ou moins à ceux établis sur le sol soumis à l'évaporation (Barnes et Allison, 1983) dans la littérature. Le front d'évaporation du profil P1 (avant irrigation) est remarqué près du sol à une profondeur d'environ 4,5 centimètres. Pour le profil P3 (après irrigation), le front d'évaporation est situé à une profondeur entre 20 et 25 centimètres.

Cependant, pour le profil P2 (pendant l'irrigation), le front d'évaporation n'est pas très marqué, ce qui peut être lié à une erreur de prélèvement.

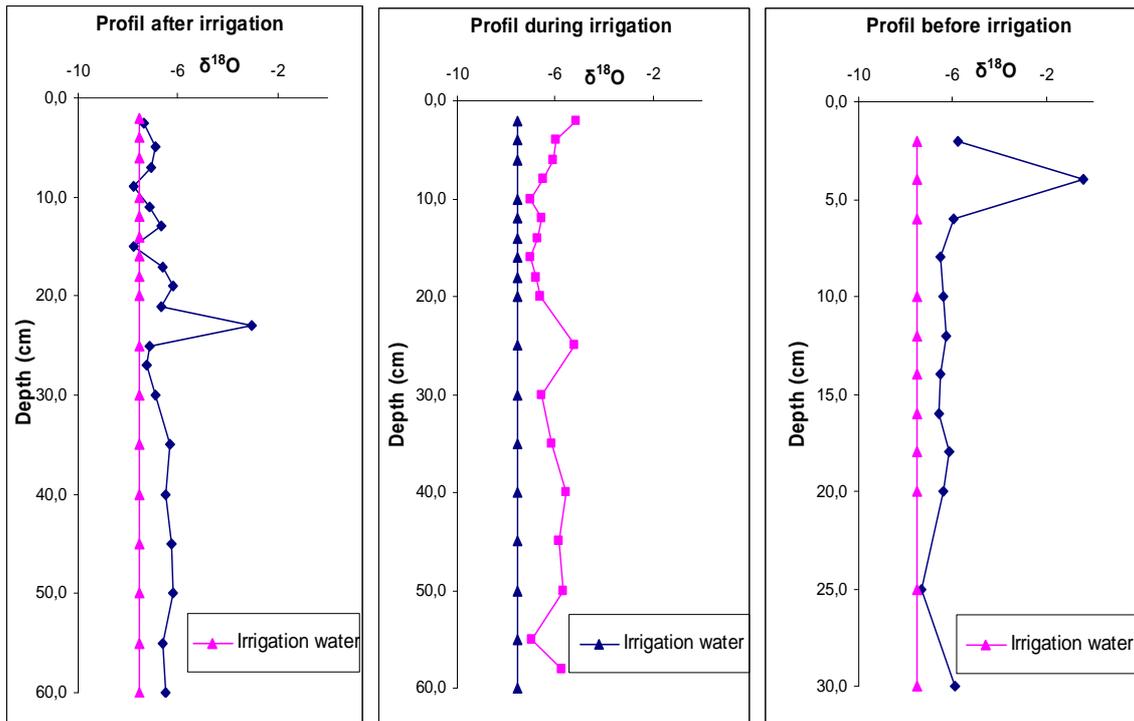


Figure 15 : Profils de ($\delta^{18}\text{O}$) dans le sol

3) Séparation E et T (méthode Keeling plot)

3-1) Calcul de δET

3-1-1 Calcul de la concentration en eau [H_2O]

Des mesures d'humidité et de température ont été effectuées en même temps que la collecte de la vapeur atmosphérique (sur 5 niveau l'intérieur de la couche limite de végétation), et la concentration en eau est calculée par l'équation suivante (McRae, 1980):

$$H_2O(\text{mmolmol}^{-1}) = \frac{10h[P_a \exp(13.3185t - 1.9760t^2 - 0.6445t^3 - 0.1299t^4)]}{P_a}$$

Où P_a est la pression atmosphérique standard (environ 1013,25 hPa)

$t = 1 (373.15/T_a)$. (T_a température atmosphérique)

h : Humidité

3-1-2 Keeling plot δa en fonction de $(1/[H_2O])$

Le δ_{ET} est déterminé tout en utilisant l'inverse de la concentration de vapeur ($1/[H_2O]$) lors des périodes d'échantillonnage de chaque hauteur, et les valeurs isotopiques de la vapeur d'eau ($\delta^{18}O$ ou δD) collectée à l' hauteur correspondante et δ_{ET} correspond à l'intersection de la relation linéaire du mélange isotopique (voir figure16).

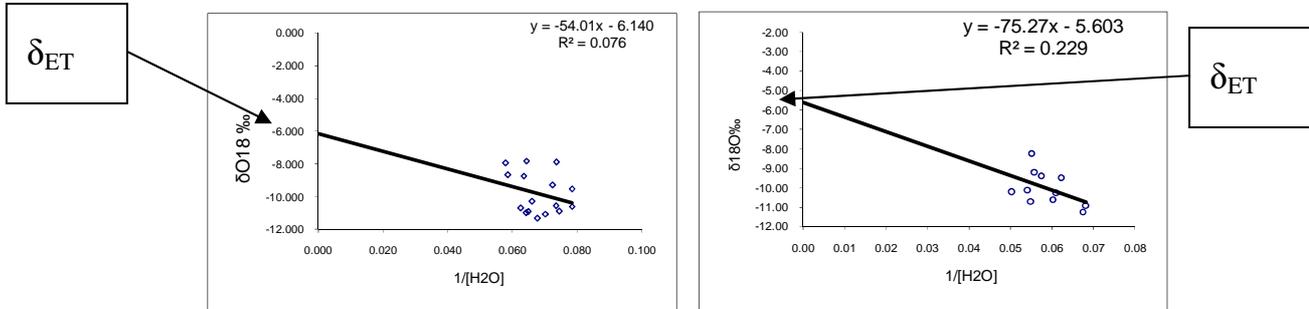


Figure 16 : Keeling plot $\delta^{18}O$ en fonction de $1/[H_2O]$

D'après les courbes de keeling plot (Keeling et al 1961) il apparaît que la transpiration qui domine comme composante principale dans l'évapotranspiration.

3-2) Calcul de la composition isotopique du flux d'évaporation du sol δE (Craig et Gordon 1965)

L'évaporation du sol et la transpiration des plantes sont les deux composantes de l'évapotranspiration. Le signal isotopique des eaux transpirées est la même que celle des tiges puisque la plante n'exerce aucun fractionnement isotopique lors de l'absorption de l'eau (Wershaw et al.1966). La composition du flux d'évaporation du sol δE est calculée par la formule de Craig et Gordon 1965 : (voir tableau 4).

$$\sigma_E = \frac{\alpha^* \sigma_{surf} - h \sigma_{atm} - \epsilon_{eq} - (1-h) \epsilon_k}{(1-h) + (1-h) \epsilon_k \frac{\epsilon_k}{1000}}$$

α^* : Le facteur fractionnement à l'équilibre '(dépend température) ;

ϵ_k : Le facteur de fractionnement cinétique ;

ϵ_{eq} : $(1 - \alpha^*)1000$ ‰ ;

h : Le taux d'humidité relative a la surface du sol ;

δ_{atm} : La composition isotopique de la vapeur atmosphérique ;

δ_{surf} : La composition isotopique de l'eau du sol à la surface d'évaporation.

L'équation qui décrit ce facteur α^* est réalisée par Majoube 1971

$$^{18}\text{O}\alpha^* = [1.137(10^6 T^2) - 0.4156(10^3 T) - 2.0667]/1000 + 1$$

Avec T, la température du sol mesuré à 5cm de profondeur en degrés Kelvin.

Merlivat 1978 a estimé ϵ_k en utilisant le rapport de diffusion de 1.0251 pour H₂O:HDO et 1.0281 pour H₂O:H₂¹⁸O, respectivement.

Tableau 4 : Paramètre utilisés pour estimer la composition isotopique du flux d'évaporation selon le model (δE) Craig-Gordon

	Température du sol	Humidité %	δs	δa	α^*	ϵ_k	δE
16/07/2010	302,244	43,057	-6,27	-9,447	1,0091	1,0281	- 10,758
17/07/2010	302,102	33,63	-6,77	-9,9	1,0091	1,0281	- 11,287

La contribution de chaque composante (évaporation et transpiration) dans le flux d'évapotranspiration total est calculée par la formule suivante :

$$F_T = \frac{\delta_{ET} - \delta_E}{\delta_T - \delta_E}$$

Avec

δ_{ET} : intersection de la régression linéaire de ($\delta^{18}\text{O}$) et 1/[H₂O] ;

δ_E : calculé avec eq Craig et Gordon ;

δ_T : composition isotopique des eaux de tige.

Considérant que l'évaporation du sol est la première source et la transpiration de la plante est la deuxième source, la contribution de la transpiration dans évapotranspiration totale est de 100% et 96% pour l'O concernant les 16 et 17 juillet respectivement (voir tableau 5).

Tableau 5 : La contribution de chaque composante (évaporation et transpiration) dans le flux d'évapotranspiration total

	$\delta_T\%$	$\delta_E\%$	$\delta_{ET}\%$	$F_T\%$	$F_E\%$
16/07/2009	-5.841	-10.758 ²	-5.603	1,048	-0.446
17/07/2009	-5.90	-11.210	-6.140	0,955	0.0214

Conclusion

Durant cette étude un prélèvement plus avancé et plus méthodique des diverses eaux dans la zone d'étude a été effectué, toutefois la base de données a pu tracer les eaux dans les différents compartiments du continuum sol-plante-atmosphère.

L'eau de la précipitation et du sol est alignée selon LML, ce qui montre une absence de tout phénomène d'évaporation ni pendant la chute de la pluie ni pendant l'infiltration de l'eau.

Nous notons une évaporation significative qui affecte l'eau de surface, alignée selon une ligne d'évaporation $y = 5,5807x - 6,0058$ avec un coefficient de corrélation de $R^2 = 0,9562$. On note aussi que l'eau de l'irrigation est également lignée sur cette même ligne.

La variation de la teneur en ¹⁸O en fonction de la profondeur, montre un front d'évaporation pour le profil 3. Sur le profil 1 on remarque que le front d'évaporation a migré suite à la succession des événements d'irrigations.

La technique du keeling plot et le model de Craig et Gordon nous a permis de déterminer la contribution de chaque composante (évaporation et transpiration) dans la composante principale de perte d'eau : évapotranspiration. Durant les deux jours d'échantillonnages, la contribution de la transpiration dans l'évapotranspiration totale est de 100% pour la date du 16 juillet et de 96% pour le 17 juillet ; Ce qui confirme l'efficacité du système d'irrigation utilisé.

Perspectives

- Proposer des modèles mathématiques pour le suivi de la variation du signal isotopique dans le continuum sol plante atmosphère.
- Etaler l'étude sur beaucoup d'espèces et des cultures (systèmes d'irrigation).

Références bibliographiques

- **Barnes C.J. and Allison G.B.**, (1983) - The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils: I. Theory, *J.Hydrol.*, 60,141 – 156.
- **Chaponière A.**, (2005) - Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride - Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain), encadrement ESCADAFAL R et BOULET G. Thèse de l'institut national Agronomique Paris Grignon, 268 p.
- **Cochet A., Hazan, R. et Monition, L.**, (??) - Le Haouz de Marrakech bassin représentatif d'une zone aride au contact d'une haute chaîne montagneuse : le Haut Atlas de climat subhumide P564-567/ Service des Ressources en Eau, Rabat .
- **Craig H.**, (1961) - Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133: 1702-1703.
- **Craig H. and Gordon L.I.**, (1965) - Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and marine atmosphere. In *proc. Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures, 1965, Spoleto, Italy.* edited by E. Tongiogi, pp 9-130, V. Lishie F., Pisa.
- **Dansgard W.**, (1964) - Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16: 436-468.
- **Déleens E.**, (1997) - Méthodologie ^{15}N . in : Assimilation de l'azote chez les plantes .Edition INRA, mieux comprendre, PP ,265.180.
- **Ehleringer J.R.**, (2000) - Assessing ecosystem-level water relations through stable isotope ratio analysis. In O.E. Sala, R.B. Jackson, - Mooney H.A., and Howarth R.W(eds.), *Methods in Ecosystem Science.* Springer, New York, pp. 181-198.
- **Yepez Enrico A., Travis Huxman E., Danielle Ignance D., Nathan English B., Jake Weltzin F., Alejandro Castellanos E., David Williams G.**, (2005) - Dynamics of transpiration and evaporation following a moisture pulse in semiarid grassland: A chamber-based isotope method for partitioning flux components /*Agricultural and forest Meteorology* 132. 359-376.
- **Epron D.**, (2007) - L'approche isotopique, une méthode d'investigation puissante de l'acquisition et de l'utilisation de l'eau par les plantes /Colloque scientifique "L'eau en horticulture, économiser maintenant.
- **Epstein E.**, (1972) - Mineral nutrition of plants: principles and perspectives. John Wiley, New York.
- **Ezzahar J.**, (2007) - The use of the Scintillation Technique for estimating and monitoring water consumption of olive orchards in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, vol. 89, pp. 173-184.
- **Fontes J.Ch.**, (1976) - Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles: quelques aspects. (Thèse Doct. Etat, ès Sc. Nat. Univ O. et M. Curie, Paris VI).
- **Gibson J.J.**, (2002) - Short-term evaporation and water budget comparisons in shallow arctic lakes using non-steady isotope mass balance *Journal of Hydrology*.

- **Helliker B.R.**, (2002) - A rapid and precise method for sampling and determining the oxygen isotope ratio of atmospheric water vapor. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 16: 929-932.
- **Hernandez M., Miller S.N., Goodrich D.C., Goff B.F., Kepner W.G., Edmonds C.M., Jones K.B.**, (2000) - Modelling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment*, 64, 285-298.
- **Majoube M.**, (1971) - Fractionnement en oxygène-18 et en deutérium entre l'eau et sa vapeur. *Journal de Chimie Physique* 68: 1423-1436.
- **McRae G.J.**, (1980) - A simple procedure for calculating atmospheric water vapor concentration. *J. Air Pollution Control Association* 30: 394-396.
- **Meier-Augenstein, Wolfram and Lui R.H.**, (2004) - Forensic applications of isotope ratio mass spectrometry, in: J. Yinon(Ed.), *Advances in Forensic Applications of mass spectrometry*, CRC press, USA, pp.149-180.
- **Merlin O.**, (2005) - Assimilation de l'humidité des sols désagrégés en ondes un modèle hydrologique utilisant échelle grossière données météorologiques *J. Hydrométéores*, 7 , 1308-1322.
- **Merlin O.**, (2005) - A combined modeling and multi-spectral/multi-resolution remote sensing approach for disaggregation of surface soil moisture: application to SMOS configuration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, pp. 2036-2050.
- **Merlivat L.**, (1978) - Molecular diffusivities of H₂ 16O, HD16O, and H₂ 18O in gases, *Journal of Chemical Physics* 69 2864–2871.
- **Pilgrim D., Chapman, T.G, Doran, D.**, (1988) - Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. *Hydrological Sciences Journal / Journal des Sciences Hydrologiques*, 33(4), 379-40.
- **Tripp J.A., Hedges R.E.M.**, (2004) - Single-compound isotopes analysis of organic material in archeology, *LC GC N. Am.* (11)1098.
- **Wang X.F., Yakir D.**, (1995) - Temporal and spatial variation in the oxygen-18 content of leaf water in different plant species. *Plant Cell Environ* 18: 1377–1385.
- **Wershaw R.L., Friedman I., Heller S.J.**, (1966) - Hydrogen isotope fractionation of water passing through trees. In *Advances in Organic Geochemistry*, ed. F Hobson, M Speers, pp. 55–67. New York: Pergamon.
- **Williams D.G.**, (2004) - Components of evapotranspiration in an olive orchard determined by eddy covariance, sap flow and stable isotope agricultural and forest *Meteorology* 125(2004) 241-258.
- **Zine N., Abdelfadel B., Dhimmi B.**, (2007) - Utilisation des techniques isotopiques pour l'étude de fonctionnement, de délimitation des zones d'alimentation et de protection des sources d'eau à fort débit au Maroc/ Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTN) et Agence Internationale de l'Energie Nucléaire (AIEA). Projet MOR8/012 (2005-2007).