



Année Universitaire : 2013-2014



Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**LA RIVIERE SOUTERRAINE DE WIN
TIMDOUINE (Haut Atlas Atlantique, Agadir
Maroc) : ETUDE HYDROGÉOCHIMIQUE ET SPÉLÉOLOGIQUE**

Réalisé par :

EZINI El Arabi

Encadré par :

- BERRAOUZ El Hassane, Faculté des Sciences (FS), Agadir
- BENAABIDATE Lahcen, Faculté des Sciences et Techniques (FST), Fès

Soutenu Le 20 Juin 2014 devant le jury composé de :

- Pr. BERRAOUZ E. H.
- Pr. BENAABIDATE L.
- Pr. JABRANE M.
- Pr. RAIS N.
- Mr. BENABDELHADI M.

Stage (de 135 jours) effectué : Au laboratoire LAGAGE, FS Agadir



Résumé

Le plateau de Tasroukht est un « bassin hydrogéologique » d'environ 16km² drainé essentiellement par la rivière souterraine de Win Timdouine. Cette rivière souterraine ne tarit jamais, et ses débits à la résurgence montrent des variations considérables, caractéristiques des sources à réponse immédiate.

La grotte des lacs « Win Timdouine », célèbre par son caractère karstique, est pleine de formes endokarstiques (stalactites, stalagmites, draperies, et gours...) et exokarstiques (vallées sèches, dolines, lapiaz, avens et travertins...).

Les eaux des sources de la région (Win Timdouine, Tinfrit, Tirhanimine, Tanit, Aguerd...) et les puits environnants ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques et montrent une excellente qualité chimique des eaux (400µs/cm) de la source de Win Timdouine et une qualité moyenne des autres sources.

Les eaux de certains puits et sources sont chargées en sulfates surtout ceux du puits Aguerd (918,56mg/l), de la source de Tamlalt (498.13mg/l), du puits de Tizgui N Chorfa (454.40mg/l), et de la source de Tanguit (441.87mg/l). Ces sulfates sont issus de la dissolution des formations gypsifères du Jurassique.

Mots clés : Plateau de Tasroukht, Tazentoute, Win Timdouine, Imouzzet des Ida Outanane, Hydrogéochimie, isotopes, Karst, Jurassique, Maroc.

Abstract

The plateau of Tasroukht is a "groundwater catchment" of about 16km² mainly drained by the underground river of Win Timdouine. This underground river never dries up and its resurgence flows show considerable variations (characteristic of springs with immediate response).

“Win Timdouine” the cave of lakes, famous for its karstic nature, is full of endokarstic forms (stalactites, stalagmites, draperies and gours ...) and exokarstic (dry valleys, dolines, lapiaz, avens and travertins ...).

The water from springs (Win Timdouine, Tinfite, Tirhanimine, Tanit, Aguerd...) and surrounding wells (in the study area) were the subject of physico-chemical analyses. These analyses show an excellent chemical quality of Win Timdouine's spring (400µs/cm) and a moderate quality of the other springs.

The groundwater of some wells and springs is loaded with sulfates, especially the samples of Aguerd's well (918.56mg/l), Tamlalt's spring (498.13mg/l), Tizgui N Chorfa's well (454.40 mg/l), and the spring of Tanguit (441.87mg/l). These sulfates are the result of the dissolution of Jurassic gypsiferous formations.

Key Words: Underground River, Win Timdouine, Tazentoute, High Atlas, Hydrogeochemistry, isotopic analysis, karsts, Morocco.

REMERCIEMENTS

Ma sincère reconnaissance et ma vive gratitude D'abord, s'adressent à mes encadrants **Monsieur BERAAOUZ El Hassan**, et **Monsieur BENAABIDATE Lahcen**, pour la qualité de leur encadrement, pour leurs conseils pertinents, pour le temps qui m'ont consacré, pour les discussions fructueuses, pour les remarques et les critiques constructives et pour la confiance qui m'ont fait.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et vifs remerciements, en particulier à mon professeur **BERAAOUZ El Hassan**, qui m'a bien accueilli dès le premier jour du stage, et m'a suivi pas à pas, par son correction, ses conseils, et interdictions. Sans oublier la disponibilité de ses documents précieux. Merci pour votre encadrement fructueux.

J'adresse mes chers remerciements et profondes gratitude à mon encadrant le professeur **BENAABIDATE Lahcen**, pour son aide et conseil, malgré la distance qui nous sépare. Sa boîte e-mail et son numéro de téléphone étaient les fenêtres de contact sans cesse. Je lui remercie aussi pour les cours qui nous a offert durant notre formation master. Merci monsieur pour votre aide.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et vifs remerciements, au Directeur du Laboratoire de Géologie Appliquée et Géo-Environnement (LAGAGE) le professeur **BOUCHAOU Lhoussaine**, d'abord pour m'avoir accepté à préparer mon mémoire au sein du laboratoire, il me considérait comme un doctorant parmi ses doctorants. Merci mon professeur pour votre aide et support en particulier dans le sujet des isotopes, qui représente une nouvelle chose pour moi.

Je remercie vivement le professeur **LAHRACH Abderrahim**, responsable du master Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux (HSQE), ainsi que tous mes professeurs à la faculté des sciences et techniques de Fès.

Je remercie le jeune docteur, mon ami **EL BAHAT Abd El Hakim** pour ses remarques pertinents et suggestions sur ce mémoire. Je remercie tous les doctorants du laboratoire LAGAGE. Je pense particulièrement à **AIT BRAHIM Yassine**, et **NDA Baudelaire**. Merci pour vos soutiens, conseils, et discussions constructives. Merci pour tous mes amis à la ville d'Agadir et ceux à Fès, et en premier lieu les étudiants du master HSQE.

Ce mémoire représente le moment privilégié pour exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à l'ensemble des personnes qui comptent dans ma vie. Je ne coûte rien sans vous mes chers **PARENTS**, mes fidèles **FRERES** et **SŒURS**, et tous les membres de ma grande famille « **Oulad HAMMADI BEN MAHDI** ». Merci pour votre support financier et morale fournie durant ma vie scolaire, mon parcours universitaire, et la préparation de mon présent master.

S O M M A I R E

Résumé-----	I
Abstract -----	II
REMERCIEMENTS-----	III
Sommaire-----	IV
Liste des figures-----	VI
Liste des tableaux-----	VII
Liste des images-----	VII
A. INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUE -----	1
B. SITUATION GEOGRAPHIQUE-----	2
CHAPITRE I : HYDROLOGIE ET CLIMATOLOGIE -----	5
1. PRECIPITATION-----	5
2. RUISSELLEMENT -----	11
3. TEMPERATURE -----	11
4. DEBIT A LA SOURCE -----	11
5. EVENEMENTS HISTORIQUE-----	12
CHAPITRE II : GEOLOGIE DU SITE WINTIMDOUINE -----	13
1. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA REGION D'IMOUZZER DES IDA-OUTANANE -----	13
2. LITHOSTRATIGRAPHIE DU SITE WIN TIMDOUINE-----	15
3. STRUCTURATION ET FRACTURES DU SITE WIN TIMDOUINE -----	21
4. PLISSEMENT DU SITE WIN TIMDOUINE-----	22
CHAPITRE III : HYDROGEOLOGIE ET SPELEOLOGIE -----	24
1. LE PROCESSUS DE KARSTIFICATION -----	24
2. LE SYSTEME KARSTIQUE DU PLATEAU DE TASROUKHT -----	25
3. SPELEOLOGIE ET FORMES KARSTIQUES -----	26
a. Les Spéléothèmes :-----	27
▪ Les stalactites : -----	28
▪ Les stalagmites : -----	28
▪ Les Colonnes : -----	29
▪ Les draperies : -----	30
▪ Les gours : -----	31
▪ Les disques et marmites : -----	31
▪ Autres merveilles : -----	32
b. Les formes exo-karstiques : -----	32
▪ Les travertins : -----	32
▪ Les lapiez : -----	33
▪ Les dolines : -----	33
▪ Les avens : -----	34
▪ Les vallées sèches : -----	35
4. CARTOGRAPHIE DE LA GROTTÉ -----	37
CHAPITRE IV : APPROCHE HYDROCHIMIQUE DE WIN TIMDOUINE -----	39
1. HYDROCHIMIE ELEMENTAIRE -----	41
a. Caractéristiques physico-chimiques des eaux -----	41
▪ La Température -----	42

▪	Le potentiel de l'ion Hydrogène (pH)	42
▪	La Conductivité Electrique (CE)	43
➤	La source Tamlalt	44
➤	La source Win Timdouine	44
➤	La source Tanguit	45
b.	Caractérisation chimique des eaux	45
i.	Les éléments majeurs	46
	<i>Interprétation des données :</i>	48
ii.	Eléments mineurs et traces	49
c.	Détermination des Faciès chimiques	49
d.	Faciès chimique des trois sources	53
	<i>Interprétation minéralogique :</i>	56
2.	L'HYDROCHIMIE ISOTOPIQUE :	60
C. CONCLUSIONS, DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES		63
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE		66
REFERENCES WEBOGRAPHIQUES		69
LES ANNEXES		I
Historique et description speleologique de Win Timdouine		II
1.	HISTORIQUE DE WIN TIMDOUINE	II
2.	DESCRIPTION SPELEOLOGIQUE DE LA GROTTTE	III
Materiels et méthodes utilises lors de la preparation de ce memoire		V
1.	SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	V
2.	TRAVAUX DE TERRAIN ET TRAVAUX AU LABORATOIRE	VI
a.	La Géologie	VII
b.	L'Hydrochimie	VII
c.	La Spéléologie	IX
3.	MATERIELS UTILISES	X
i.	Matériel utilisés <i>in situ</i>	XI
ii.	Matériels utilisés en laboratoire	XII

LISTE DES FIGURES

Figure1 : Schéma montre la situation géographique du site Wintimdouine	5
Figure2 : Pluies annuelles au niveau de la station d'Imouzzer	8
Figure3 : Comparaison historique entre les paramètres de pluviosité de la région	9
Figure4 : Pluies moyennes annuelles enregistrées dans la station Abdelmoumen	11
Figure5 : La répartition et l'hétérogénéité des précipitations mensuelles	12
Figure6 : Coupe de la zone méridionale du Haut Atlas Occidental	15
Figure7 : Extrait de la carte géologique du Maroc pour situer le secteur de WT	16
Figure8 : Coupe stratigraphique de Tazentoute	17
Figure9 : Schéma explicatif de la falaise carbonatée 5	21
Figure10 : Cadre structural de la région Win Timdouine	25
Figure11 : Schéma de dissolution des roches carbonatées (karstification)	27
Figure12 : Blocs diagrammes expliquant les étapes de formation d'un réseau souterrain	27
Figure13 : Représentation schématique, d'un paysage karstique (Bakalowicz, 1999)	29
Figure14 : Représentation schématique de l'intérieur d'une grotte	30
Figure15 : Etapes de formation d'une doline	36
Figure16 : Schéma illustre la rivière souterraine de Win Timdouine	38
Figure17 : Carte simplifié de la rivière souterraine de Wintimdouine	40
Figure18 : Extrait de la carte topographique d'Imouzzer, pour les trois sources identifiées	42
Figure19 : Représentation graphique, de l'évolution spatiale de la température des eaux	44
Figure20 : Graphique montre la variation et l'hétérogénéité du pH des eaux	45
Figure21 : Représentation de la variation spatiale de CE pour les échantillons étudiés	46
Figure22 : Répartition de la représentativité de la teneur moyenne en chaque élément	50
Figure23 : Diagramme triangulaire de Piper pour les eaux de la région	52
Figure24 : Graphique obtenue par le logiciel Diagramme pour Ca-Mg	54
Figure25 : Les faciès chimiques des trois sources du site Win Timdouine	55
Figure26 : Graphique montre Ca-Mg valeurs en (mg/l)	57
Figure27 : Graphique montre une comparaison entre la minéralisation des roches dissoutes par les eaux de Win Timdouine	58
Figure28 : Graphique montre une comparaison entre la minéralisation des roches dissoutes par les quatre échantillons des eaux identifiées	60
Figure29 : Variation des teneurs en ^{18}O en fonction du ^2H dans les eaux de WT	63
Figure30 : Processus naturels pouvant influencer les compositions en Deutérium et en Oxygène-18 des eaux souterraines (d'après Clark et Fritz, 1997)	64
Figure31 : Carte de localisation des points d'eau échantillonnés	ANNEXE2

LISTE DES TABLEAUX

Tableau1 : Comparaison historique entre les paramètres de pluviosité de la région	9
Tableau2 : Les précipitations mensuelles de l'Est du site Wintimdouine,	10
Tableau3 : Paramètres physico-chimiques des eaux de la région	43
Tableau4 : Les résultats d'analyses des éléments majeurs de l'eau	48
Tableau5 : Normes de potabilité selon l'OMS 2011	50
Tableau6 : Grille simplifiée des normes marocaines pour les eaux souterraines	51
Tableau7 : Les éléments mineurs et traces disponibles	51
Tableau8 : Résultats des analyses isotopiques pour les eaux de la grotte Win Timdouine	62

LISTE DES IMAGES

Image1 : Les deux premières couches dans le log	18
Image2 : La 2 ^{ème} formation géologique comme elle apparaît dans le plateau	18
Image3 : Couche de calcaire gris clair assez fragile, dalle souterrain Win Timdouin	19
Image4 : Formation N°4 d'âge Rauracien moyen	19
Image5 : La formation géologique numéro 5, où se développe Win Timdouine	20
Image6 : La couche calcaire N°5, tout près de l'entrée de la grotte	20
Image7 : Marno-calcaire gris sombre et marne grise ou blanchâtre d'âge Oxfordien	21
Image8 : Formation basaltique N°15 dans le log	23
Image9 : La faille décrochante suivant laquelle se développe la grotte Win Timdouine	24
Image10 : Photo d'une stalactite de Win Timdouine	30
Image11&12 : Des stalagmites de Win Timdouine	31
Images13&14 : Formation d'une colonne	32
Images15, 16&17 : Images de l'intérieur de Win Timdouine montre des draperies	33
Images18&19 : Images des marmites et disques	34
Image20 : Exemple des travertins où il y a des eaux qui s'écoulent	35
Image21 : Lapiez du plateau de Tasroukht	35
Image22 : Doline dans le plateau de Tasroukht d'environ 10m de diamètre	36
Images23&24 : Exemples des avens du site Win Timdouine	37
Images25&26 : Au sein du laboratoire LAGAGE	ANNEXE2
Image27 : Observation d'un faciès géologique	ANNEXE2
Image28 : Mesures hydrochimiques de terrain, puits et bassin de l'Association du village Asofid à Tazentoute	ANNEXE2
Images29, 30, 31&32 : Lors de la préparation, du déplacement et de l'installation de l'auto-échantillonneur au sein de la grotte	ANNEXE2

<u>Image33</u> : A l'intérieur de la grotte Win Timdouine	<u>ANNEXE2</u>
<u>Images34, 35, 36, 37&38</u> : l'auto-échantillonneur utilisé au cours de cette étude	<u>ANNEXE2</u>
<u>Image39</u> : Un marteau utilisé lors des études géologiques	<u>ANNEXE2</u>
<u>Image40</u> : Matériels spéléologiques d'initiation pour l'entrée à la grotte	<u>ANNEXE2</u>
<u>Images41, 42, 43&44</u> : Appareil isotopique du LAGAGE, ainsi que la préparation des échantillons dans les chariots	<u>ANNEXE2</u>
<u>Images45&46</u> : Spectrophotomètre à U-V (à droite), et spectrophotomètre à flamme (à gauche)	<u>ANNEXE2</u>
<u>Image47, 48&49</u> : Parmi les verreries du LAGAGE	<u>ANNEXE2</u>

A. INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUE

La rivière souterraine Win Timdouine (la grotte des lacs, en langue locale) est la plus longue de son genre dans l'Afrique (19km des galeries). Pour une étude délicate d'une région Karstique, de telle importance, le chercheur nécessite l'utilisation de plusieurs disciplines scientifiques, Géologie, Hydrogéologie, Chimie, Hydrologie, Climatologie, et Spéléologie, afin de bien cibler l'objectif souhaité.

La région d'Imouzzer des Ida-Ou-Tanane au Nord de la ville d'Agadir, est un domaine célèbre par ses sources d'eau, gorges, grottes, et cascades... Le site de Win Timdouine est un secteur riche en formes Karstiques et sources d'eau souterraines à partir du plateau de Tasroukht jusqu'à Tazentoute vers le SW (source Tamlalt, Win Timdouine, Tanguit...), et même après Tazentoute jusqu'au village Aguerd dans le même sens (source Tirhanimine, les trois sources de Tanit...).

Dix-neuf échantillons d'eau ont été prélevés depuis le plateau de Tasroukht jusqu'au village Aguerd, parmi lesquels les trois premières sources : la source Tamlalt (dans le plateau), la source Win Timdouine (la résurgence de la rivière souterraine, au bas de la falaise du plateau), et la source Tanguit au voisinage de Win Timdouine.

Les échantillons d'eau sont analysés sur le terrain (paramètres physiques) et au laboratoire (éléments majeurs, traces et isotopes). Les résultats des analyses physico-chimiques seront discutés dans la partie IV, afin d'essayer de mettre en évidence la relation qui existe entre la roche et l'eau, ou plus précisément entre la variation spatiale et la variation chimique des sources d'eau dans la région.

Après avoir situé le secteur d'étude, les conditions climatiques de la région sont données dans le premier chapitre. Le contexte géologique est présenté dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre est consacré à l'hydrogéologie et la spéléologie du site Win Timdouine. Le dernier chapitre est consacré à l'approche hydrochimique des eaux de Tazentoute en générale et du site Win Timdouine en particulier.

B. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Au Nord d'Agadir, à environ 57Km dans les montagnes d'Imouzzer des Ida Outanane, se trouve la grotte des lacs « **Win Timdouine** ».

La région d'Ida-Ou-Tanane, est limitée (voir schéma ci-après, figure 1) :

- Au Nord, par l'oued Tinkert et l'oued Tamri qui marquent le passage de la zone plissée des Ida Outanane à la zone tabulaire du plateau des Haha ;
- A l'Ouest, par l'océan Atlantique avec une côte découpée, à reliefs plongeant brutalement dans la mer ;
- A l'Est, par la vallée de l'oued Issen (ou couloir d'Argana) qui sépare les Ida Outanane de la haute chaîne primaire (paléozoïque) ;
- Au Sud, par la retombée brutale des plis de Jbel Lgouz (la vallée effondrée du Souss).

Notre travail est focalisé sur le site de Win Timdouine dont les coordonnées sur la carte topographique d'Imouzzer au 1/50000 sont X=122, Y=415 et altitude Z=1400m, et les coordonnées GPS sont : Latitude (30.680374° N), et Longitude (-9.344738° W).

L'accès au site Win Timdouine, se fait par deux voies principales :

- La route nationale RN8 en direction de Marrakech jusqu'au km 49 au panneau indicateur et prendre la route goudronnée 7003 étroite et sinueuse jusqu'au parking situé à environ 200m de l'entrée de la grotte (voir schéma ci-après, figure 1) ;
- La route nationale N1 en direction d'Essaouira, au village Aourir suivre la direction d'Imouzzer Ida Outanane et à quelques km du centre rural d'Imouzzer prendre à droite la route goudronnée qui mène à la grotte.

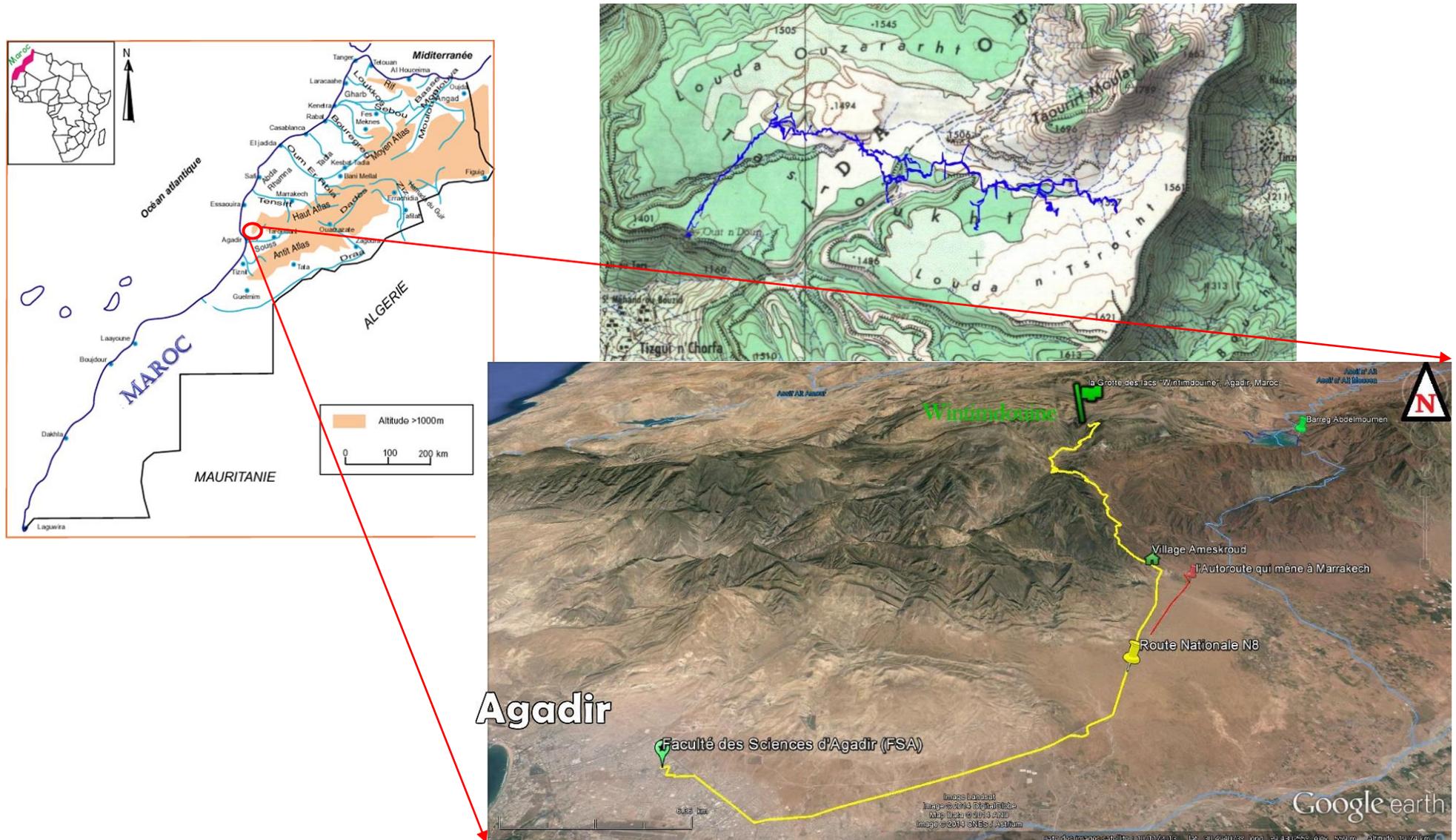


Figure1 : Schéma montre la situation géographique du site Win Timdouine, ainsi qu'un extrait pour le plateau de Tasroukht avec projection du réseau souterrain Win Timdouine (en haut à droite).

Les oueds sont imposés dans le relief. Le réseau hydrographique est très dense et comprend deux grands systèmes :

- Le système atlantique où tous les oueds sont côtiers, écoulant leurs eaux d'Est en Ouest. Ce système draine principalement deux bassins versants : celui de l'oued Tamri (le talweg le plus long est de l'ordre de 110km) et celui de l'oued Tamraght.
- Le système du Souss, dans lequel les oueds s'écoulent sensiblement vers le sud soit en direction de l'Oued Issen soit de l'Oued Souss.

Administrativement, le site Win Timdouine fait partie de Tazentoute, commune Idmine, préfecture d'Inezgane Ait Melloul, Wilaya Agadir, Région Souss Massa Draa.

En plus de son importance touristique (grottes, sources, gorges, cascades, patrimoine local,...), la région d'Imouzzer des Ida Ou Tanane est un site de grande importance pour les scientifiques (Géologues, Archéologues, Hydrogéologues, Ecologistes, Biologistes...).

Le site de Win Timdouine est célèbre par le plus grand réseau karstique de l'Afrique du Nord (19km des galeries).

CHAPITRE I : HYDROLOGIE ET CLIMATOLOGIE

Le climat de la région d'Imouzzer des Ida Ou Tanane représente le contexte d'un climat **semi-aride très variable**. Ce climat subit l'influence de plusieurs facteurs locaux et régionaux parmi lesquels on cite : les **latitudes d'une région présaharienne** (une aridité puissante de la Sahara Africaine) et la **haute altitude des chaînes montagneuses** du Haut Atlas, ainsi que **l'influence océanique** (océan Atlantique).

Le parallélisme, l'interférence entre ces facteurs et la complexité exigeante qu'ils obligent, font de l'étude climatique une importance inévitable comme étape préliminaire pour les scientifiques afin de construire une idée globale sur la région pour des études –en particulier- hydrologique (hydrodynamie souterraine, infiltration, ETR, débit).

Les données climatologiques utilisées sont celles des stations d'Imouzzer et du Barrage Abdelmoumen respectivement situées à 15Km à l'Ouest et à 6 à 7Km à l'Est du site WT.

1. Précipitation

La pluviométrie moyenne annuelle est de 387mm au barrage Abdelmoumen et de 450mm à Imouzzer.

Le diagramme ci-dessous (figure 2) montre l'évolution pluviométrique entre les années 1932 et 2009 enregistré par la station d'Imouzzer, identifiée par les coordonnées : X=109,600 ; Y=415,250 ; et Z=1310m :

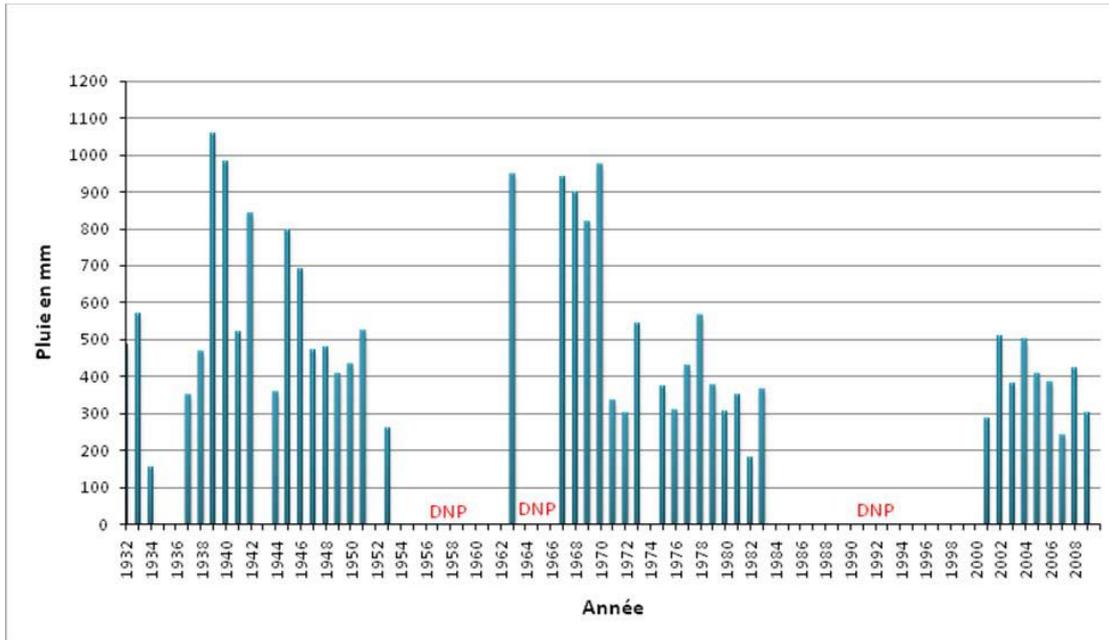


Figure2 : Pluies annuelles au niveau de la station d'Imouzzer (1932-2009), DNP : données non disponibles.

Il est indiscutable que la tendance générale des pluviosités évolue vers la sécheresse. En négligeant les données non disponibles, trois principaux blocs apparaissent dans ce diagramme de la gauche (les données les plus anciennes) vers la droite (données plus récentes) :

- ⊕ Un premier bloc des données, avec un maximum d'environ **1060mm** et **six années** connaissent une pluviosité supérieure à **500mm** durant dix années consécutives entre 1938 et 1948 (la période la plus représentative) ;
- ⊕ Un deuxième bloc des données, avec un maximum d'environ **980mm** et **cinq années** d'une pluviosité supérieure à **500mm** durant dix années consécutives entre 1968 et 1978 ;
- ⊕ Un troisième bloc des données, avec un maximum d'environ **507mm** et **deux années** d'une pluviosité supérieure ou égale à **500mm** durant dix années consécutives entre 1999 et 2009.

Le tableau suivant présente le résumé de l'historique pluviométrique :

Tableau1 : Comparaison historique entre les paramètres de pluviosité de la région d'Imouzzer.

La période	1938-1948	1968-1978	1999-2009
Précipitation max (en mm)	1060	980	505
L'année du maximum	1939	1970	2002
Précipitation min (en mm)	360	300	235
L'année du minimum	1944	1972	2007
Max-Min	700	680	270
Précipitation moyenne (en mm)	620	553	380
Nombre des années plus pluvieuses que 500mm	6	5	2

Pour faciliter la lecture de cette comparaison, on a procédé à réaliser ce bloc-diagramme ci-dessous :

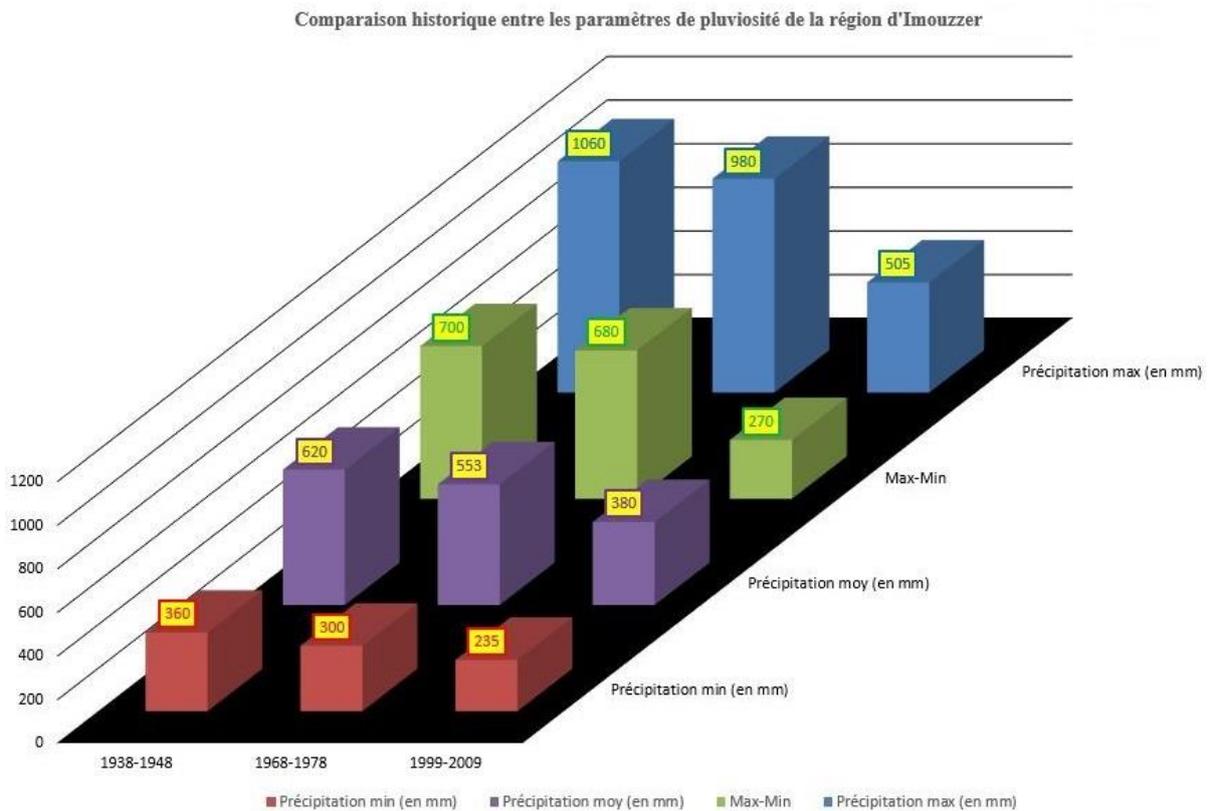


Figure3 : Comparaison historique entre les paramètres de pluviosité de la région d'Imouzzer.

Au barrage Abdelmoumen, les données disponibles sont regroupées dans le tableau ci-après (page suivante, Tableau2) :

Tableau2 : Les précipitations mensuelles d'Imouzzer des Ida-Ou-Tanane, enregistrées par la station du barrage Abdelmoumen entre 1984 et 2012.

Pluies mensuelles												Période :	Toutes les mesures	
N° Station :	77807		X : 127,250		Y : 402,700		Z : 700		Autorité :		ABHSM		mm	
Nom :	ABDELMOUMEN												Unité :	mm
Année / Mois	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Total	
1984/85	0,0	0,0	171,6	36,6	112,5	41,8	3,1	4,2	0,5	0,0	0,0	1,2	371,5	
1985/86	0,0	8,2	23,4	25,0	0,6	268,5	52,5	19,2	1,9	0,2	0,0	0,0	399,5	
1986/87	7,8	12,4	2,5	0,0	53,4	25,6	1,8	1,1	8,3	0,0	0,0	0,8	113,7	
1987/88	23,3	55,5	137,2	367,4	64,1	128,9	86,4	0,0	48,4	2,5	0,0	0,0	913,7	
1988/89	0,4	88,9	231,3	0,0	20,9	3,6	17,6	30,8	0,0	0,2	0,0	0,8	394,5	
1989/90	1,2	36,0	199,0	156,7	12,9	0,0	86,7	32,8	4,2	0,3	3,3	0,0	533,1	
1990/91	0,0	1,4	2,5	79,5	0,0	106,9	173,4	1,0	0,0	0,3	1,0	0,0	366,0	
1991/92	2,4	48,2	9,9	93,6	0,0	33,9	2,2	13,0	0,0	0,0	18,0	0,0	221,2	
1992/93	0,0	3,0	0,0	4,3	51,8	13,2	27,2	0,0	32,7	0,0	0,0	0,0	132,2	
1993/94	0,0	204,8	76,8	2,6	19,0	16,2	62,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	381,7	
1994/95	0,0	15,2	0,0	5,4	0,0	18,0	109,5	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	157,4	
1995/96	4,1	12,0	108,0	289,1	375,5	64,1	144,7	2,7	25,1	17,0	0,0	0,0	1042,3	
1996/97	2,0	2,6	79,6	312,4	91,6	0,5	12,6	40,1	0,0	0,0	0,0	0,0	541,4	
1997/98	1,3	27,6	7,3	11,6	132,0	212,4	61,7	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	455,9	
1998/99	0,0	0,0	4,5	20,3	31,9	7,0	60,0	0,5	1,8	0,0	2,0	2,3	130,3	
1999/00	0,0	125,2	0,3	42,9	9,3	0,0	0,0	66,4	1,0	0,0	0,0	0,0	245,1	
2000/01	0,0	0,0	0,8	148,2	2,2	0,0	14,6	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	168,0	
2001/02	5,8	0,0	7,6	128,7	2,4	19,7	104,2	63,6	0,0	0,0	0,0	0,0	332,0	
2002/03	0,0	0,4	74,7	130,0	0,0	2,4	23,8	28,8	0,0	4,8	0,0	8,5	273,4	
2003/04	0,0	55,9	139,8	47,7	0,0	148,4	40,6	12,1	25,3	0,0	0,0	0,0	469,8	
2004/05	0,0	10,9	62,3	24,5	0,0	119,0	36,5	0,0	2,5	0,0	0,0	2,4	258,1	
2005/06	0,0	18,5	45,6	48,8	98,9	21,3	26,4	9	0	0	0,7	0	269,2	
2006/07	0,0	25,7	18,0	0,0	21,0	8,8	0,0	6,8	3,0	0,0	0,0	13,9	97,2	
2007/08	2,8	8,9	29,6	27,2	3,2	38,4	8,9	13,5	0,5	0,5	0,0	0,1	133,6	
2008/09	21,4	121,9	61,9	31,8	27,5	82,6	31,6	0,0	0,0	7,2	0,0	0,4	386,3	
2009/10	2,3	0,2	0,0	532,9	39,2	387,3	11,9	83,8	0,6	0,0	0,0	32,7	1090,9	
2010/11	26,1	20,7	277,7	75,6	82,4	0,0	119,9	70,1	75,8	0,0	0,0	0,0	748,3	
2011/12	0,0	7,2	18,7	0,0	4,4	0,0	0,4	27,0	0,0	1,3	1,0	0,0	60,0	
Moy mensuelle	3,6	32,5	64,0	94,4	44,9	63,2	47,2	19,2	8,3	1,2	0,9	2,3	381,7	
Max	26,1	204,8	277,7	532,9	375,5	387,3	173,4	83,8	75,8	17,0	18,0	32,7	1090,9	
Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	60,0	
	: Précipitations annuelles supérieures à 1000mm/an													
	: Précipitations annuelles entre 500 et 1000mm/an													
	: Précipitations annuelles entre 100 et 500mm/an, les plus proches à la moyenne (=387mm/an)													
	: Précipitations annuelles inférieures à 100mm/an.													

Le diagramme ci-dessous (figure 4) représente la variation de la moyenne annuelle de précipitations enregistrées dans la station Abdelmoumen :

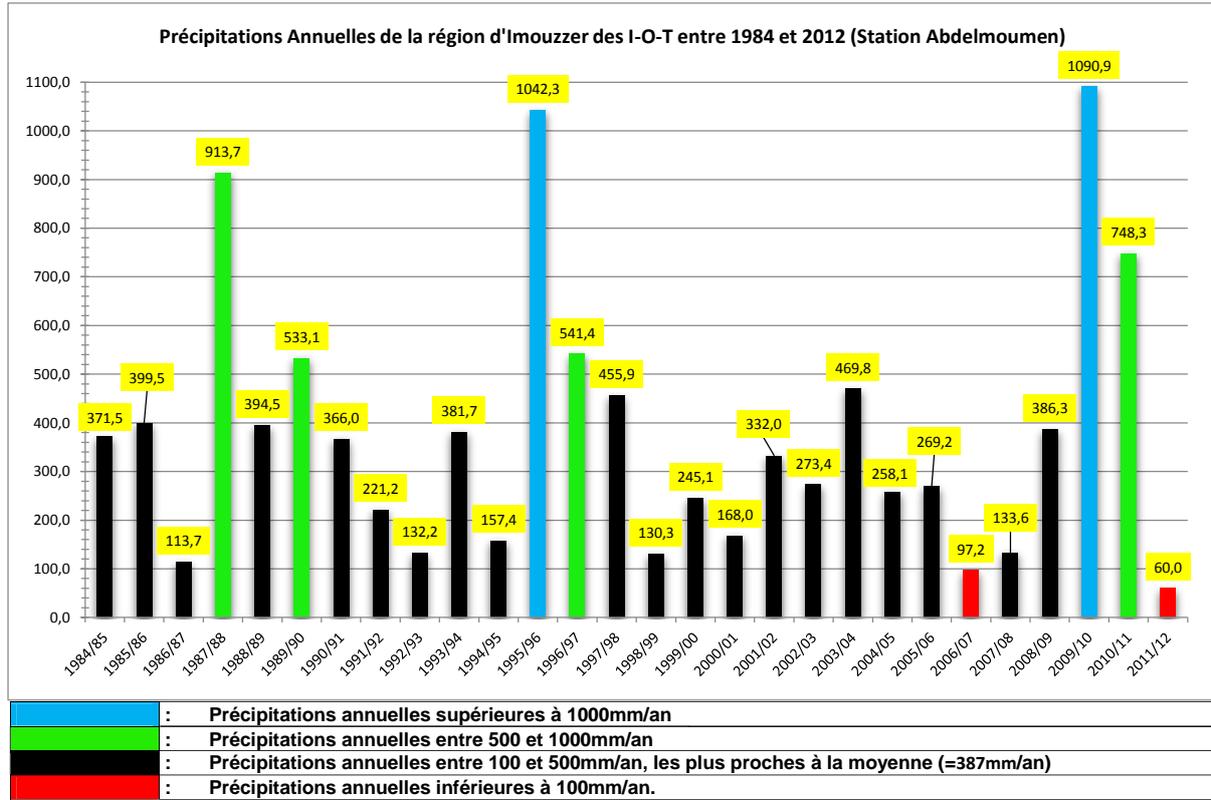


Figure4 : Pluies moyennes annuelles enregistrées dans la station Abdelmoumen (1984-2012).

L’objectif de la figure 5, est la discussion de la répartition et l’hétérogénéité des précipitations moyennes mensuelles de la région, fournies par la station Abdelmoumen qui se trouve à 6 Kilomètres à l’Est de Win Timdouine :



Figure5 : La répartition et l'hétérogénéité des précipitations mensuelles, d'après les données enregistrées par la station Abdelmoumen entre 1984 et 2012.

La précipitation mensuelle maximale est celle du mois de Décembre (532.9mm) de l'année pluviométrique 2009/2010 qui était l'année la plus pluvieuse (1090,9mm) durant les 30 dernières années depuis 1984. Ce maximum est suivi, en gros, par le mois de Février (387,3mm de la même année pluvieuse), puis Janvier (375,5mm de la deuxième année pluvieuse 1995/1996), ensuite Novembre (277,7mm de 2010/2011), Octobre (204,8mm de 1993/1994), et Mars (173,4mm de 1990/1991).

Les précipitations moyennes mensuelles montrent que le mois Décembre est le plus pluvieux (de 94,4mm), suivi de Novembre (64mm), et Février (63,2mm) ; puis Mars (47,2mm), Janvier (44,9mm), et Octobre (32,5mm) ; ensuite les mois Avril, Mai, Septembre, Août, Juin, et enfin Juillet (0.9mm).

Le bilan tiré des données pluviométriques fournies par les deux stations (station Imouzzet et station du barrage Abdelmoumen) c'est que la pluviométrie de la région décroît. Cette énonciation, s'est confirmée par le fait qu'il n'y a pas des précipitations annuelles inférieures à **100mm** avant 2006 ! En effet, la région a connu deux années pluviométriques, très rapprochées, de pluie inférieure à 100mm/an : la première, au milieu de la première décennie du siècle actuel (en 2006/2007 de 97.2mm/an), et la deuxième dans la deuxième année de la décennie actuelle (en 2011/2012 d'une valeur de 60mm/an), sans oublier l'aridité anormale des deux dernières années (2012/2013 et 2013/2014).

2. Ruissellement

Le plateau de Tasroukht est un plateau avec très peu de ruissellement, à cause de la formation carbonatée dominante qui représente une dalle en calcaire et dolomie très fracturée où se développe une quantité des dolines en nombre dénombrable, des puits absorbants et des fuites facilitant l'infiltration et la percolation des eaux dans le massif carbonaté. En effet, les témoins de cette grande infiltration, sont surtout les paysages du plateau : vallées sèches, dolines, avens...

3. Température

A la station Abdelmoumen, la moyenne de la température est de l'ordre de **10.4°C** pour le mois le plus froid (**Janvier**) et de **28.9°C** pour le mois le plus chaud (**Août**). La moyenne annuelle est de **18.8°C**.

A Imouizzer, le climat est sensiblement plus **frais** et plus **doux**, la moyenne annuelle des températures est de **17°C**. La moyenne des deux mois les plus chauds (**Juillet-Aout**) est de **33°C** (Bouchaou et Beraaouz, 2011).

4. Débit à la source

La source de Win Timdouine est l'exutoire principal du système aquifère ayant pour le bassin hydrogéologique le plateau de Tasroukht. L'historique des jaugeages montre que les débits varient entre **1,5 l/s** et **550 l/s**.

Les cas exceptionnels, étaient surtout (Bouchaou et Beraaouz, 2011) :

- **Débits maximaux** : le 25/02/1988 (**544.2l/s**), le 11/03/1988 (**290l/s**), le 11/11/1991 (**243l/s**), le 12/11/1991 (**180l/s**), et le 14/11/1991 (**166l/s**).
- **Débits minimaux** : le 09/06/1987 (**1,43l/s**), et le 10/07/1987 (**1,5l/s**).

Le 06 Mars 2014, le débit que j'ai mesuré en utilisant la simple méthode du flotteur temps-distance-section, le résultat a été **10l/4s**, soit **2.5l/s**.

5. Evènements historique

En Février 1988, c'était la période du débit maximal (544.2l/s), 9 spéléologues amateurs ont été bloqués à l'intérieur de la grotte Wi Timdouine (6 Marocains et 3 étrangers).

Ils ont pénétrés à la grotte le Dimanche 21 février 1988, pour rester 4 jours en danger sous le plateau de Tasroukht quand le niveau d'eau à l'intérieur de la grotte était trop élevé. En effet, le débit de l'eau est augmenté considérablement conséquent des pluies qui se sont abattues sur tout le sud du Pays la journée du Dimanche.

Les services de sécurité marocaine (l'inspection générale de la protection civile de Rabat, le gouverneur de la province d'Agadir, et la Gendarmerie Royale) et française (centre opérationnel direction de la sécurité civile) ont participé vivement pour faire sortir les spéléologues bloqués, dont deux étaient en état difficile. La première tentative a été réalisée le Mercredi 24 Février, mais ils n'ont pas réussi dans la mission de leur évacuation qu'au Jeudi 25 Février 1988.

Le blocage de ces 9 spéléologues dans la grotte a été causé par les pluies torrentielles qui se sont abattues à la fin de Février 1988 (la précipitation moyenne du mois Février était 129mm) sur la région.

CHAPITRE II : GEOLOGIE DU SITE WIN TIMDOUINE

1. Contexte géologique de la région d'Imouzzer des Ida-Outanane

Les Ida-Ou-Tanane, est une région géo-morphologiquement limitée au Nord par l'Assif Tinkert, à l'Est par l'Assif n'Ait Moussa (Oued Issen), au Sud par la vallée du Souss et à l'Ouest par l'océan Atlantique.

Les sédiments secondaires des Ida Ou Tanane représentent la couverture sédimentaire plastique déposée sur le matériel primaire induré, visible seulement dans la zone axiale de la haute chaîne, aux Ida-Ou-Mahmoud. Cette couverture secondaire a été fortement plissée pendant les diverses étapes de la surrection de la chaîne atlasique au Tertiaire. Ces plissements se sont traduits par la formation d'anticlinaux étroits et de synclinaux plus large (Ambroggi, 1963), (voir Figure ci-dessous).

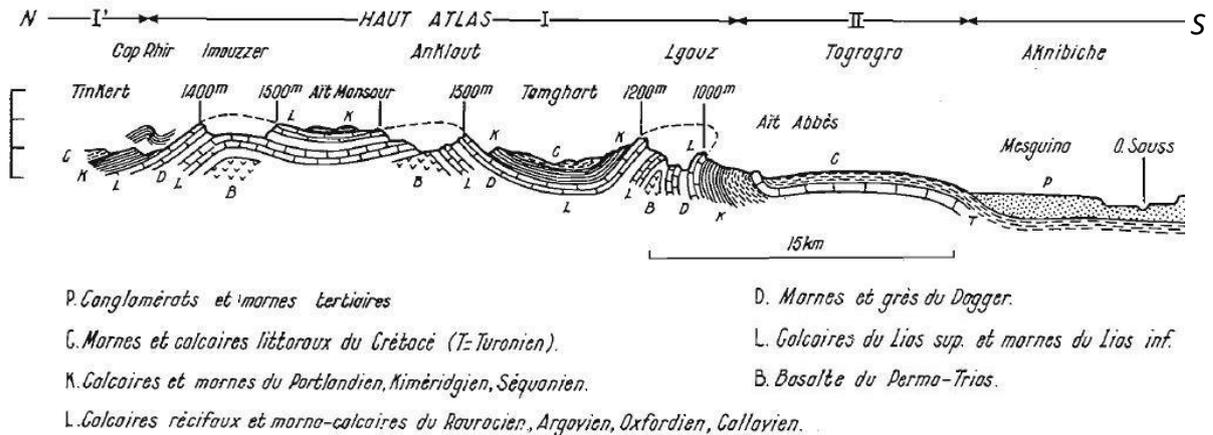


Figure 6 : Coupe de la zone méridionale du Haut Atlas Occidental (d'après Ambroggi, 1963).

L'érosion récente a arasé partiellement ces anticlinaux qui devaient culminer vers 2000 ou 2500m, et les a nivelés à une altitude voisine de 1500m. Le centre de ces anticlinaux a été érodé pour donner des dépressions presque fermées. Par contre les synclinaux n'ont subi que très peu l'effet de l'érosion et offrent de belles surfaces structurales grâce à la présence, au sein des marnes crétacées, d'assises de calcaires compacts (Ambroggi, 1963).

Cette région représente le massif montagneux le plus élevé et le plus affecté par la tectonique (failles et plissements) du Haut Atlas atlantique. Au Nord des Ida Ou Tanane, le

relief devient monotone et on entre dans le paysage tabulaire des Haha, quant au Sud il s'étend la vallée de Souss (paysage de la plaine).

En ce qui concerne le site de cette étude, le secteur de Win Timdouine : Il s'étend depuis l'Assif Tamraght jusqu'au Taourirt My Ali. Toutes les formations géologiques de ce secteur appartiennent au Jurassique (Bouchaou, et Beraaouz, 2011).

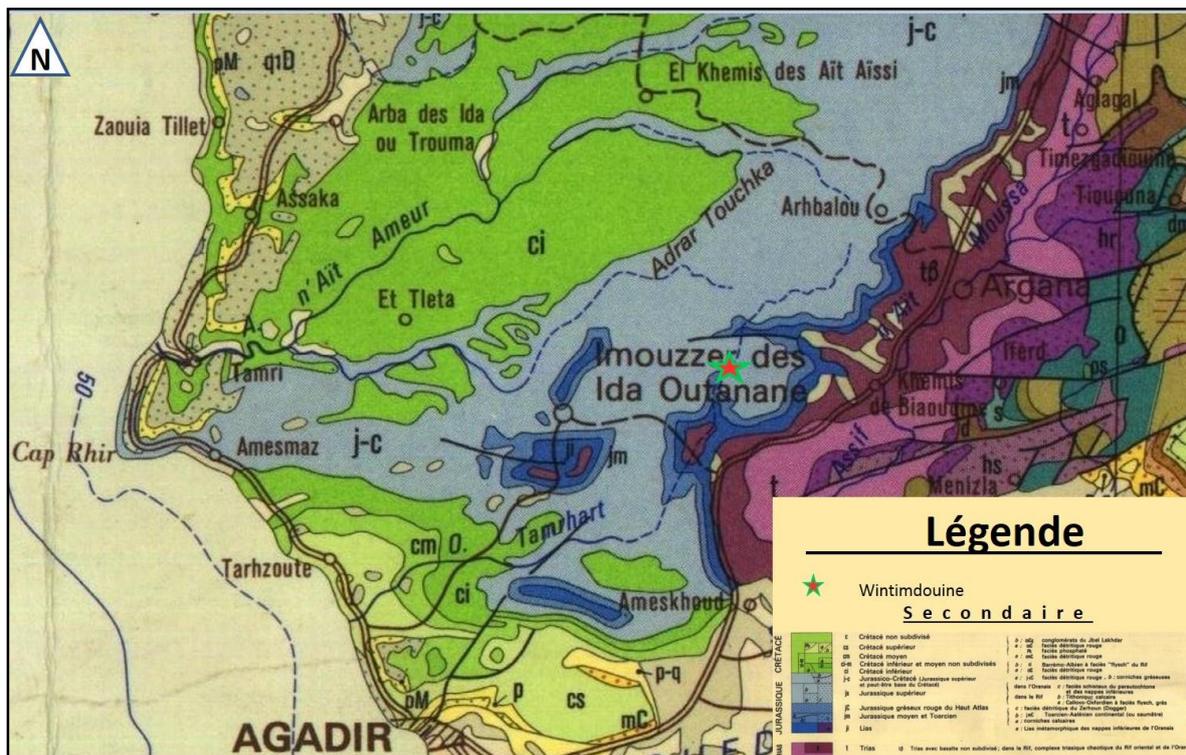


Figure7 : Extrait de la carte géologique du Maroc1985 d'une échelle de 1/1.000.000, pour situer le secteur de Win Timdouine.

2. Lithostratigraphie du site Win Timdouine

La coupe ci-dessous représente tous les faciès rencontrés depuis le sommet de Taourirt My Ali au N-E de Win Timdouine, jusqu'à Tazentoute au S-W. L'entrée de la grotte Win Timdouine est indiquée par une étoile (★).

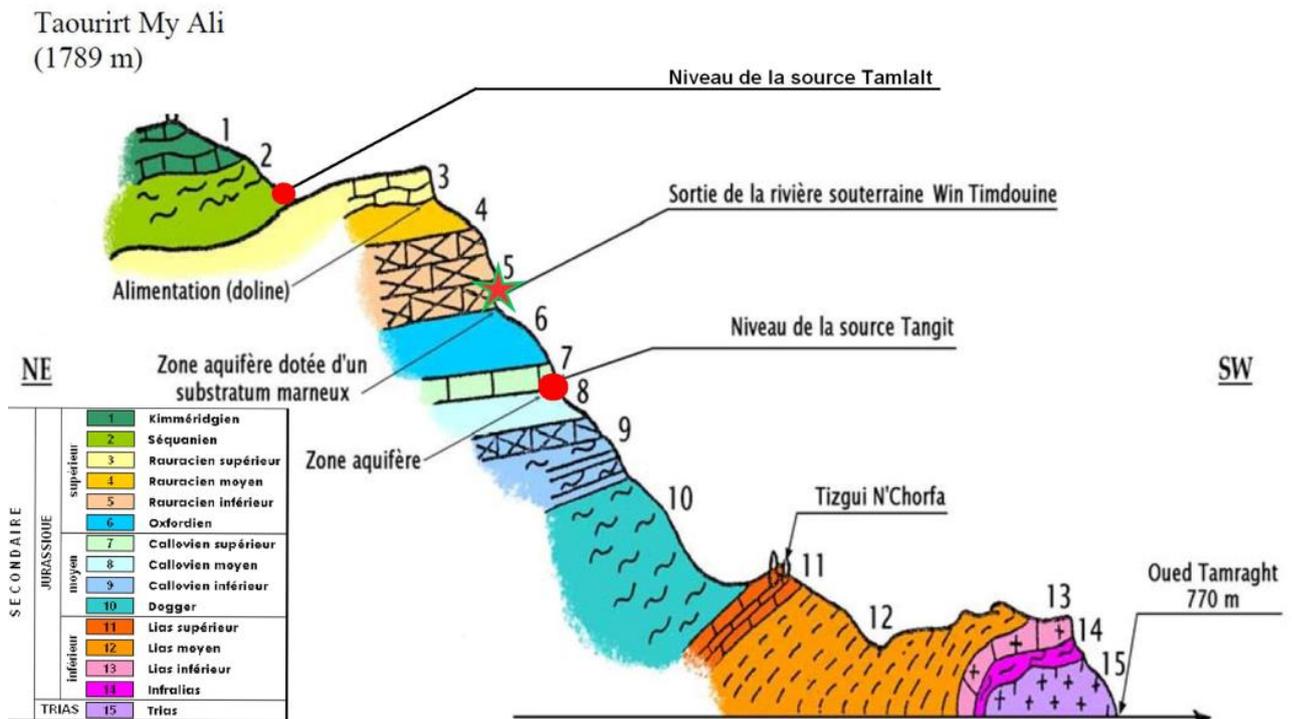


Figure 8 : Coupe stratigraphique depuis Taourirt My Ali jusqu'à Tazentoute en passant par la grotte Win Timdouine (Ambroggi, 1954).

Cette coupe a été levée depuis la rive gauche de l'Assif Tamraght (Assif N'Tanit) suivant une orientation NE-SW en commençant par la bordure du plateau de Tasroukht (la butte Taourirt My Ali) pour aboutir à un chenal situé à 1km en amont de Tazentoute et en passant par l'entrée de la rivière Win Timdouine et Zaouia Tizgu'N'Chorafa.

La description des principaux faciès lithologiques rencontrés est la suivante :

1. Deux barres calcaires séparées par une série de 50 m d'épaisseur constitués de marne et marno-calcaires de couleur chocolat d'âge Kimméridgien (environ 152Ma) ;



Image1 : Les deux premières couches dans le log.

2. Marne chocolatée du Sequanien ;



Image2 : La 2^{ème} formation géologique comme elle apparait dans le plateau.

3. Calcaire gris clair assez fragile (sans faune), marqué par des Lapiaz (érosion hydraulique), et présentant des dolines en surface. Ce calcaire constitue la couverture du plateau de Tasroukht (ou le toit du réseau souterraine Win Timdouine). L'épaisseur de cette couche est de 10 à 15m et d'âge Rauracien supérieur ;



Image3 : Couche de calcaire gris clair assez fragile, dalle du réseau souterrain Win Timdouine.

4. Marne calcaire gris clair et marne feuilletée violacée, gypsifère. Ce niveau dessine sur la bordure Nord du plateau (à environ 1400m d'altitude) des auréoles claires dépourvues de végétation (sert d'une marque de l'érosion en nappe qui s'installe généralement dans les collines où on rencontre un sol fragile facile à éroder). La couche d'âge Rauracien moyen varie en épaisseur de 10 à 15m ;

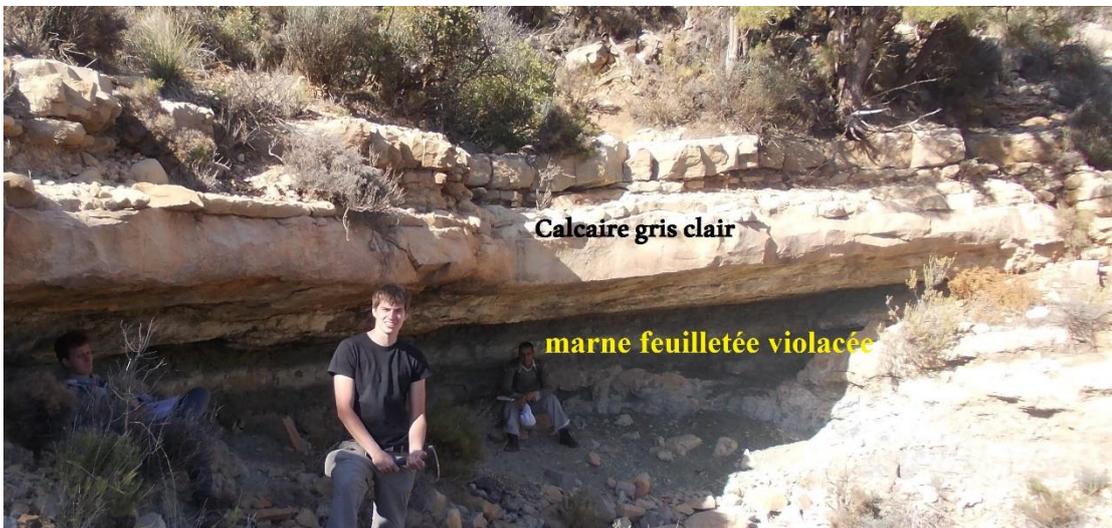


Image4 : Formation N°4 d'âge Rauracien moyen.

5. **La formation géologique où se développe la grotte WT** : calcaire dolomitique blanc ou gris (à gris noirâtre) assez compacte. Les cristaux de calcite sont brillants au soleil, le contenu fossilifère correspond surtout à des Lamellibranches de différentes tailles millimétrique à centimétrique jusqu'à 6cm, et des Brachiopodes

de couleur sombre sous forme de débris parfois complet. Cette formation a une épaisseur d'environ 50m.



Image5 : La formation géologique carbonatée, où se développe le réseau souterrain Win Timdouine.

Pour la tectonique, ce niveau (numéro 5) correspond au niveau le plus mouvementé (surtout fracturé) où on observe des décrochements senestres et dextres (image suivante).

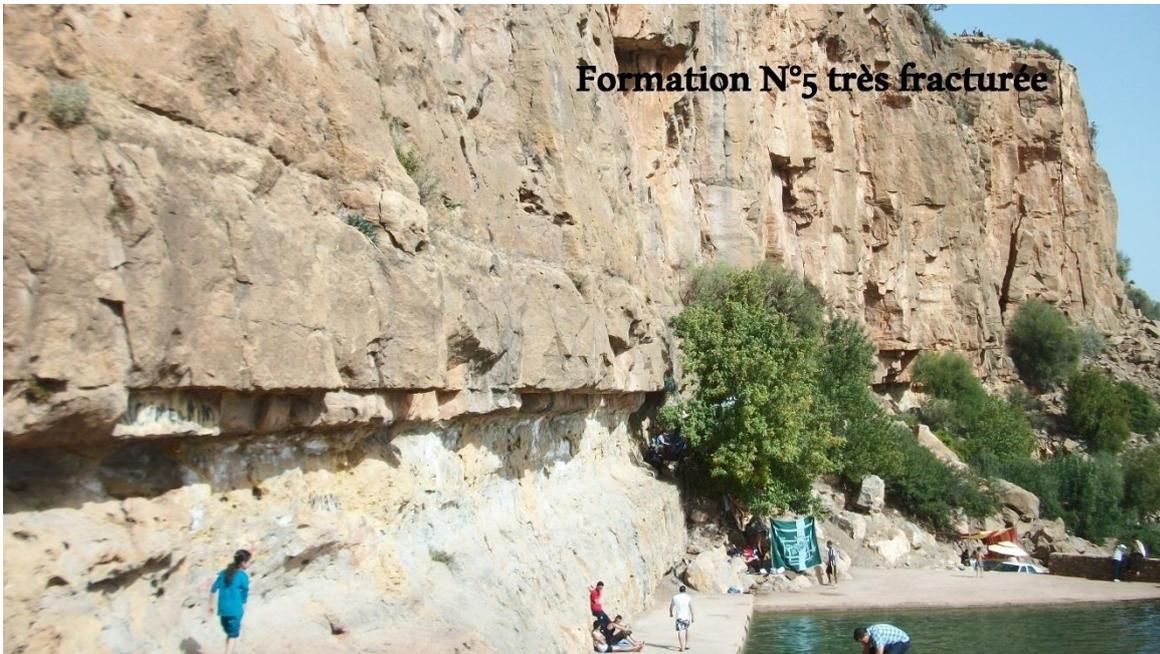
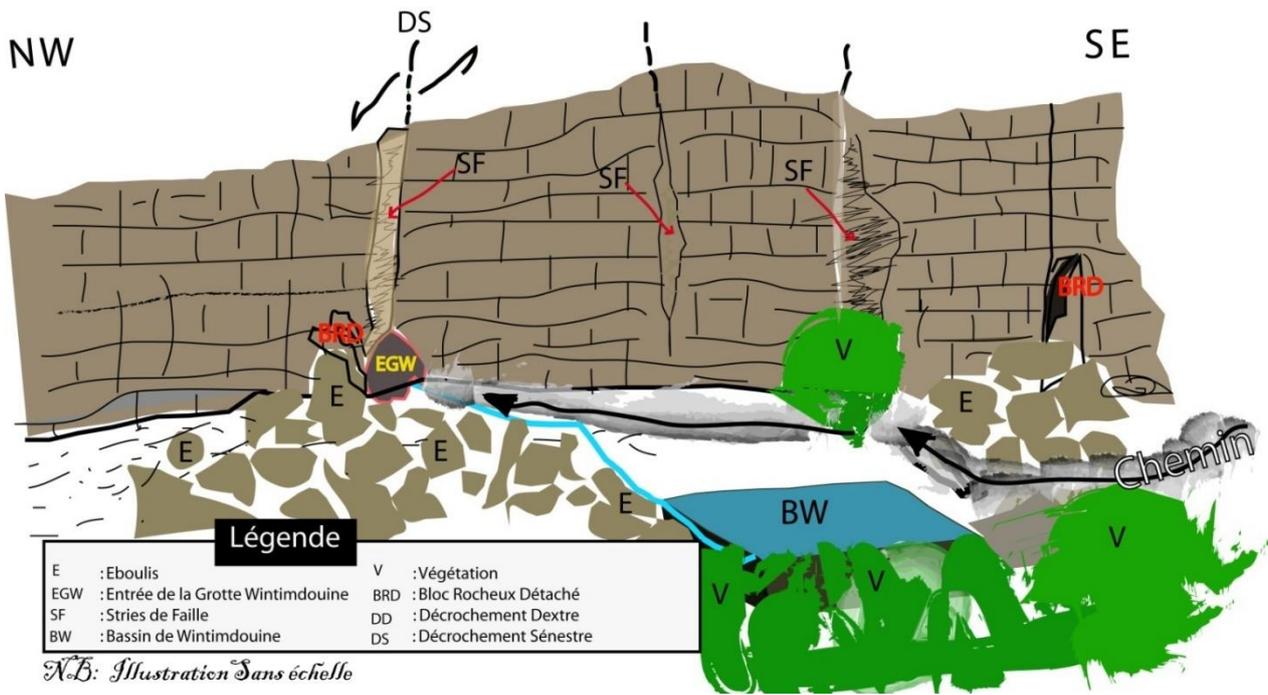


Image6 : La couche calcaire N°5, tout près de l'entrée de la grotte où apparaît son bassin de captage des eaux en bas à droite.

Vers la base de ce niveau du **Rauracien inférieur** se développe le **réseau karstique de la rivière souterraine de WT** suivant une fracture verticale principale de direction généralement NE-SW pour le premier quart du réseau, et ESE-WNW pour les trois derniers quarts, et ce en creusant par dissolution la formation (voir schéma ci-après, figure 9).



N.B: Illustration Sans échelle

Figure9 : Schéma explicatif de la falaise carbonatée 5 où apparaît l'entrée de la grotte Win Timdouine au niveau d'un décrochement sénestre.

6. Marno-calcaire gris sombre et marne grise ou blanchâtre d'âge Oxfordien (environ 156Ma) très riche en fossiles (Brachiopodes, Lamellibranches, et Gastéropodes), et représente des auréoles de recristallisation de la calcite (Géodes), notamment tout près de l'entrée de la grotte Win Timdouine (voir figure 7). Ces couches constituent dans l'ensemble environ 20m d'épaisseur ;



Image7 : Marno-calcaire gris sombre et marne grise ou blanchâtre d'âge Oxfordien, Formation N°6.

7. Calcaire dolomitique du callovien supérieur (environ 160Ma) en gros banc d'une dizaine de mètres d'épaisseur à la base de laquelle émerge la petite source Ain Tinquit qui tarit en période de sécheresse (elle se trouve dans l'Oued, sur le chemin qui mène à la grotte, entre cette dernière et son parking);
8. Calcaires et marnes vertes et violacées alternant en petits bancs d'une dizaine de mètres environ représentant le callovien moyen (environ 161Ma) ;
9. Calcaire dolomitiques blancs coupés de niveaux marneux ou marno-calcaires verts ou violacées correspondant au callovien inférieur (environ 162Ma) avec une épaisseur de 15m ;
10. Grès et marnes rouges comportant vers le sommet deux niveaux de conglomérats représentant le Dogger (entre 159 à 180Ma). L'ensemble est d'une épaisseur de 300m à peu près. Cette assise au flanc de laquelle le sentier serpente longuement est encombrée d'éboulis issus des niveaux supérieurs (9, 8 et 7) ;
11. Calcaires lités et marno-calcaire sans faune visible d'environ 40m d'épaisseur, représentant le Lias supérieur (environ 180 à 190Ma) (Ambroggi R. 1963) ;
12. Calcaires gris et marnes vertes, jaunes... les marnes prédominent dans l'ensemble, et impriment au relief une topographie molle, le faciès des marnes évoque un type lagunaire avec 200 à 250m d'épaisseur (Ambroggi R. 1963). L'ensemble représente une alternance du Lias moyen (vers 190 à 195Ma) (Bouchaou, et Beraaouz, 2011) ;
13. Calcaires jaunâtres, parfois gris ou blancs, dolomitiques d'une épaisseur entre 20 et 40m représentant le Lias inférieur (vers 195 à 200Ma), ils sont ployés à la verticale au niveau de l'oued (Bouchaou, et Beraaouz, 2011) ;
14. Argile et marnes rouges-vif formant l'infra Lias (vers 200Ma) avec une épaisseur de 10m ;

15. Basaltes dolomitiques vert-sombre très altérés, à nodules de calcédoine, et de silice colloïdale (Bouchaou, et Beraaouz, 2011). Brown (1980) les décrit comme formés de coulées multiples de basaltes vacuolaires, de 10 à 20m d'épaisseur. Signalons que les âges de ces basaltes du Haut Atlas ont été calculés par Sebai et al. (1991) et Fiechtner et al. (1992) qui proposent des valeurs de l'ordre de 200Ma par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Medina et al., 1992).



Image8 : Formation basaltique N°15 dans le log.

Le village de Tazentoute est construit sur cette formation d'âge infra-Liasique.

3. Structuration et fractures du site Win Timdouine

Cette région des Ida Ou Tanane a subi des déformations consécutives à l'orogénie atlasique. Ces déformations sont orientées sensiblement Est-Ouest conformément à la direction générale des plissements atlasiques.

La sortie de la rivière souterraine Win Timdouine est située au bas d'une falaise calcaire de 50 à 60m de hauteur, la grotte se développe suivant une faille décrochante, orientée N30 conformément à la direction générale des déformations atlasiques. L'ouverture de cette faille est de plus de 3cm au plafond de la grotte qui s'est développée par dissolution des minéraux calcaires pour laisser un espace de plusieurs mètres carrés de section (à la sortie de la grotte, environ 3 à 5m en longueur et 5 à 7m en hauteur). Cette section varie, en se déplaçant vers l'intérieur de la grotte d'une manière hétérogène même pour le bras principal (sur 9km de longueur).

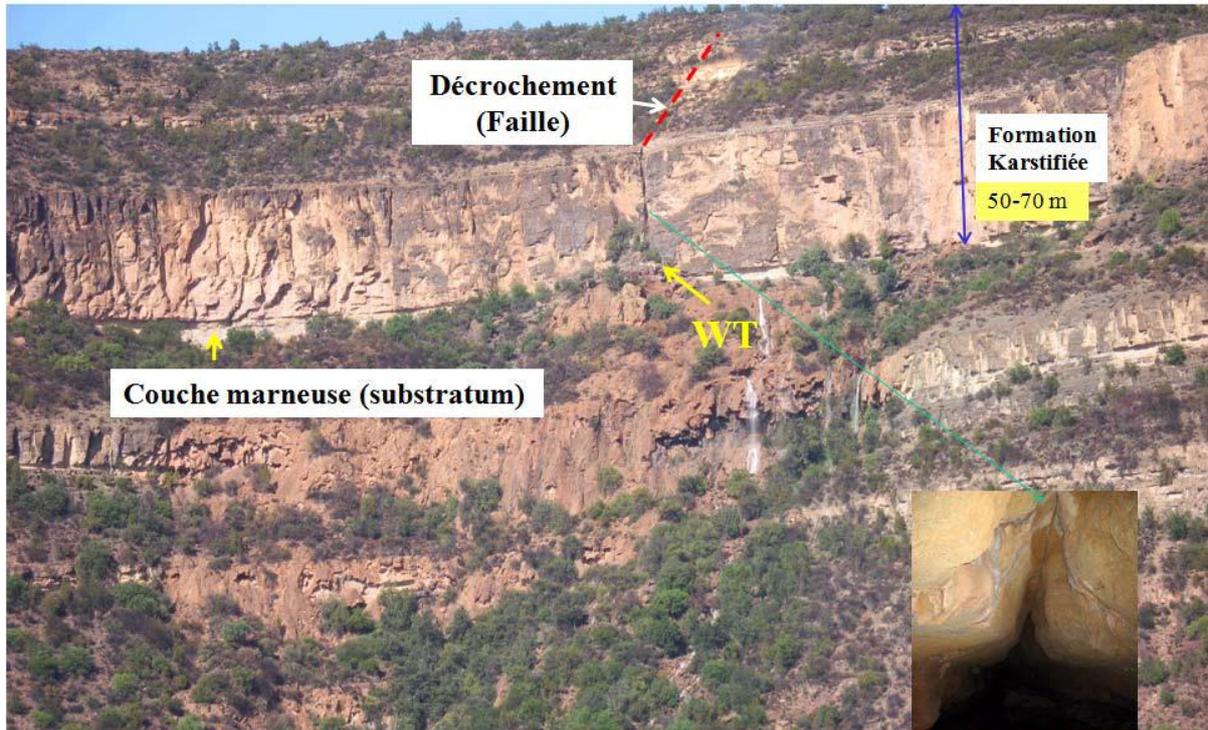


Image9 : La faille décrochante suivant laquelle se développe la grotte Win Timdouine.

D'autres décrochements apparaissent tout au long de la formation (voir images ci-avant) où la grotte se développe (formation 5), et aussi dans les formations voisines soit de la même famille qui représente les failles principales, soit d'autre famille de direction relativement proche ou de directions opposées (voir images ci-haut).

4. Plissement du site Win Timdouine

Pour la tectonique ductile, la déformation de la région d'Imouzzer des Ida Ou Tanane comporte des anticlinaux et des synclinaux à grand rayon de courbure (figure 10).

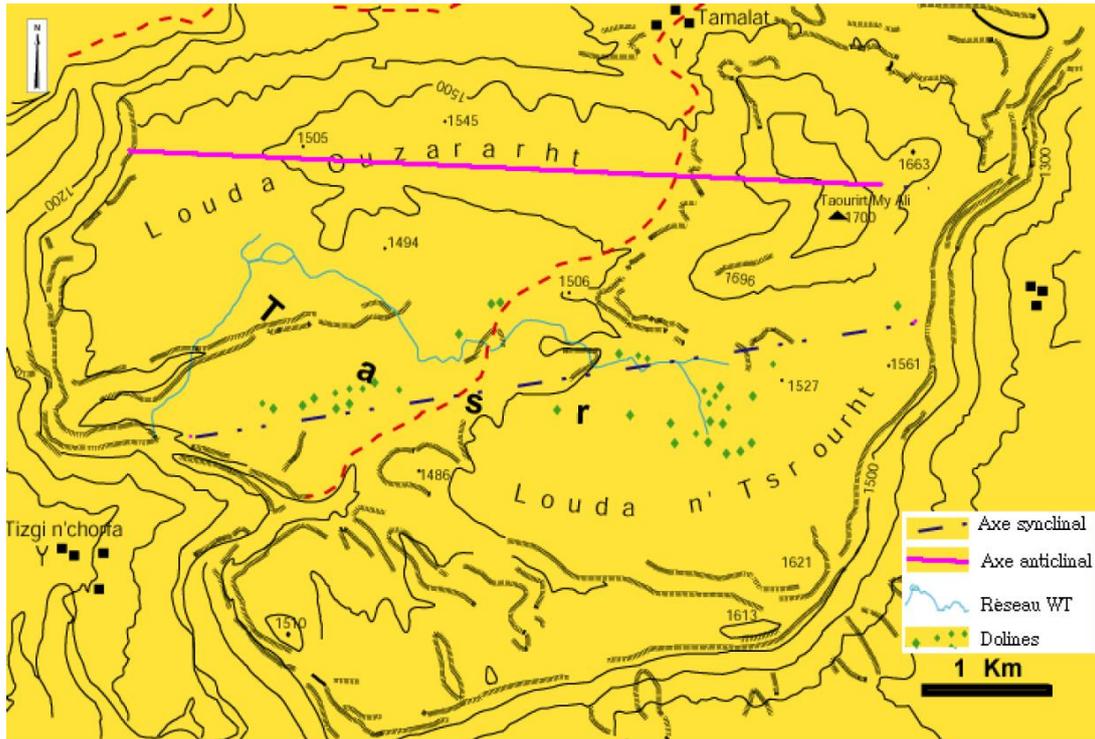


Figure10 : Cadre structural de la région Win Timdouine (selon Bouchaou, et Beraaouz 2011).

Selon la figure ci-dessus le voisinage du site Win Timdouine est plié à deux niveaux tout près de la grotte, si on les examine du Sud au Nord on constate :

- Un axe synclinal qui se dessine entre le tracé du ravin de Zaouia Tizgui n'Chorfa et le ravin nord. Son axe passe sensiblement par l'entrée de Win Timdouine, remonte vers l'Est et se termine à la bordure de la côte de Taourirt My Ali (voir figure ci-haut).
- Un deuxième anticlinal passe à la bordure nord du plateau puis par le point culminant, son axe est représenté par le trait continu.

CHAPITRE III : HYDROGEOLOGIE ET SPELEOLOGIE

1. Le processus de Karstification

Morphologiquement, le **karst** est une structure géomorphologique résultant de l'érosion hydrochimique et hydraulique de formations de roches carbonatées, principalement de formations calcaires. Les formes d'érosion de type karstique se manifestent dans des structures « endokarstiques », et « exokarstiques ».

Hydrochimiquement, le **karst** est un ensemble des formes d'érosion hydrique de surface et souterrain, résultant de la dissolution de calcaires ou de dolomies par les eaux souterraines rendues acides par la présence du dioxyde de carbone (Bakalowicz, 2002).

Le processus de karstification ou « Karstogénèse », qui englobe les différentes phases de formation d'un karst, nécessite la coexistence de (voir figure 11) :

- D'abord de l'eau **H₂O** pour dissoudre la roche ;
- De l'acide carbonique **CO₂**, qui représente le moteur de cette dissolution par l'acidité qu'introduit ;
- Et un **gradient hydraulique**, pour évacuer les matières dissoutes et renouveler l'eau (gravité...).

Tout le phénomène se passe suivant deux équations principales :

1. Dissolution du **CO₂** dans l'eau :



Puis



2. Dissolution de la calcite (**CaCO₃**) :



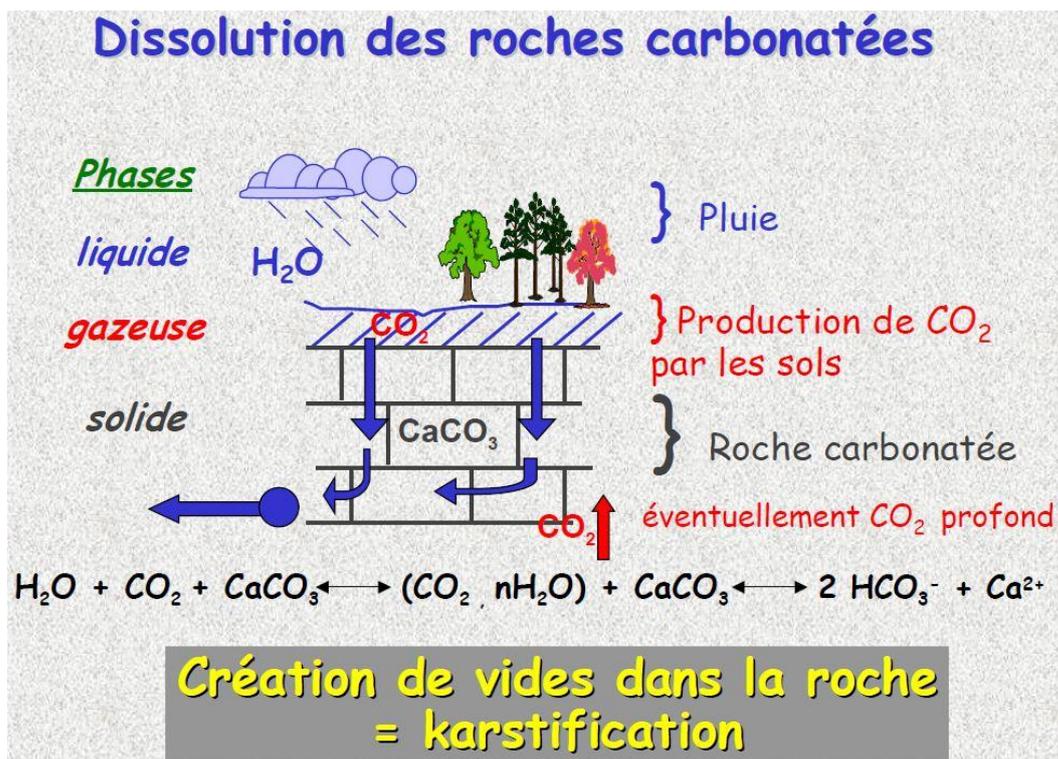


Figure11 : Schéma de dissolution des roches carbonatées (karstification) (d'après Bakalowicz, 2002).

La figure qui suit, montre les étapes de formation du système karstique et la création de la grotte avec une rivière souterraine et des lacs comme le cas de Win Timdouine.

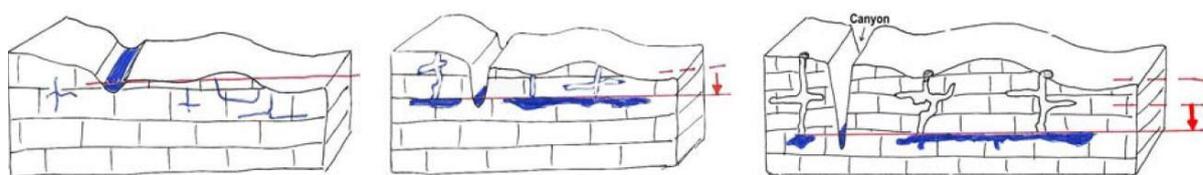


Figure12 : Blocs diagrammes expliquant les étapes de formation d'un réseau souterrain.

2. Le système karstique du plateau de Tasroukht

Le plateau de Tasroukht est un système karstique actif qui se développe dans les calcaires dolomitiques du Rauracien inférieur et qui présente une série de galeries plus ou moins rapprochées, peu étagées (puissance de la couche karstifiable de l'ordre de 50m) et dont la morphologie est tributaire de l'encaissant et du régime hydrodynamique.

Le développement du karst est favorisé par le gradient hydraulique, une humidité importante quoique contrastée (les précipitations comprises entre 240 et 505mm/an à

Imouzzet des-Ida-Ou-Tanane comme par exemple, pour la période entre 1999 et 2009) et par l'ampleur de la fracturation (direction préférentielle **NNE**).

Les circulations aquifères actuelles résultent de la configuration géologique et stratigraphique mais également du régime des précipitations et de la condensation au contact des masses d'air de l'Atlantique tout proche du domaine atlasique (Fizaine et Gamez, 2007).

3. Spéléologie et formes Karstiques

Parmi les formations karstiques, les plus répandues : les formations carbonatées. Mais, effectivement il y a d'autres de moindre importance (notamment au Maroc) : formations des roches gypsifères, formations des roches salines, formations gréseuses... le karst de Win Timdouine s'est développé au niveau des formations carbonatées (calcaire et dolomie).

En spéléologie comme en Hydrogéologie karstique, on distingue deux familles de formes karstiques (endokarstiques et exokarstiques). La figure 13 représente l'ensemble de ces formes karstiques.

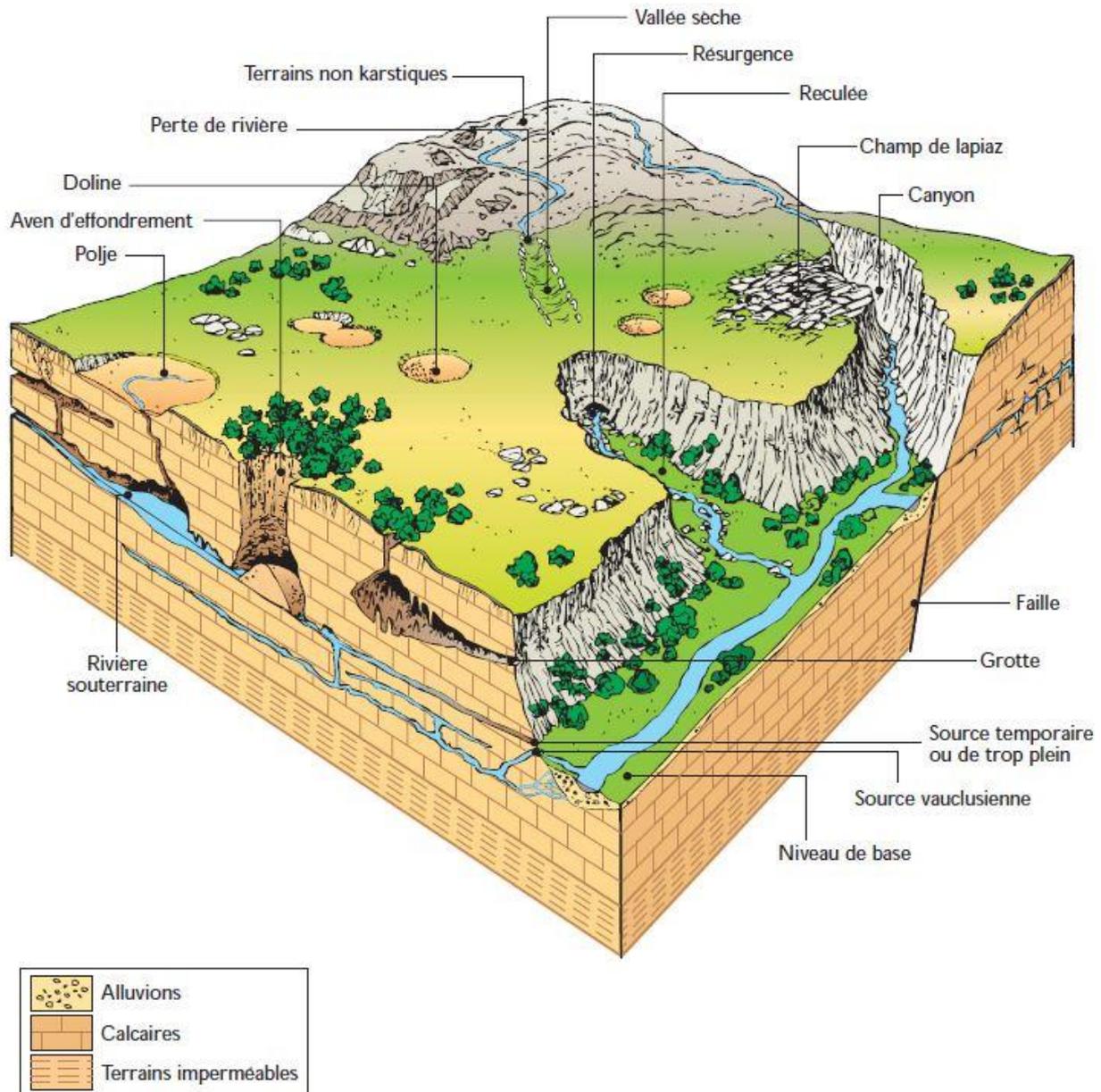


Figure13 : Représentation schématique, d'un paysage karstique (Bakalowicz, 1999).

a. Les Spéléothèmes :

Sont des formes karstiques souterraines, dénommés aussi par : **concrétions**, ou encore formes **endo-karstiques** (voir schéma ci-après).

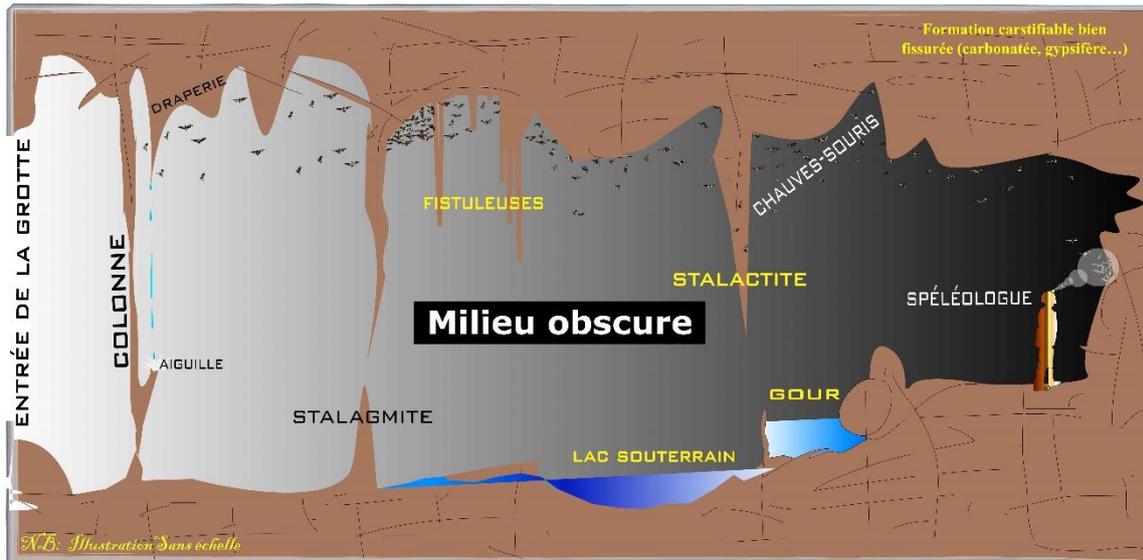


Figure14 : Représentation schématique de l'intérieur d'une grotte.

Parmi les Spéléothèmes qu'on peut rencontrer au sein de la grotte Win Timdouine, on a :

▪ **Les stalactites :**

Sous forme des tiges ou plutôt, trombe (épais à la base en haut et s'amincisse vers le bas) de la roche karstifiée fixés au plafond de la grotte et dirigés vers le sol. Ils sont creusés de l'intérieur où l'eau chargée en carbonates de calcium (CaCO_3) s'écoule. Les stalactites se forment couche par couche grâce aux renouvellements des eaux saturées en CaCO_3 , en respectant le principe de la création d'une branche de l'arbre (de l'intérieur vers l'extérieur) (voir image ci-contre).

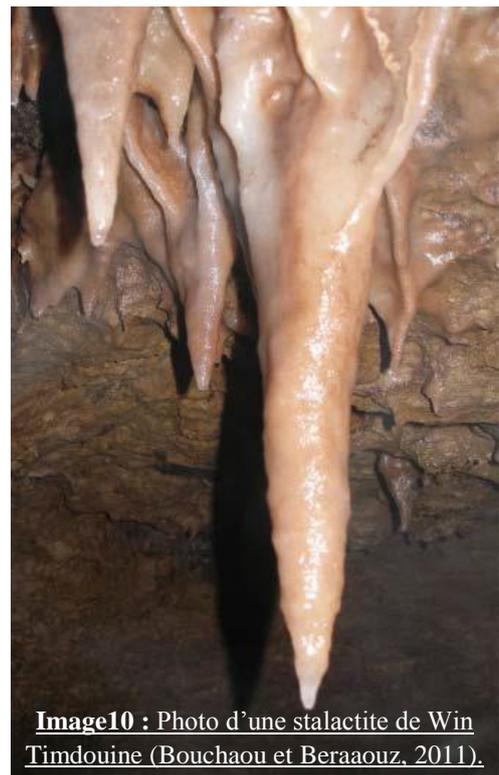


Image10 : Photo d'une stalactite de Win Timdouine (Bouchaou et Beraouz, 2011).

▪ **Les stalagmites :**

Sont des accumulations verticales de la roche karstifiée tombés sous forme d'une goutte d'eau chargées en CaCO_3 , au contact avec le sol de la grotte, le gaz carbonique CO_2

s'échappe et l'eau H₂O s'écoule, tandis que le CaCO₃ se précipite sous forme solide en créant des couches superposées l'une sur l'autre...

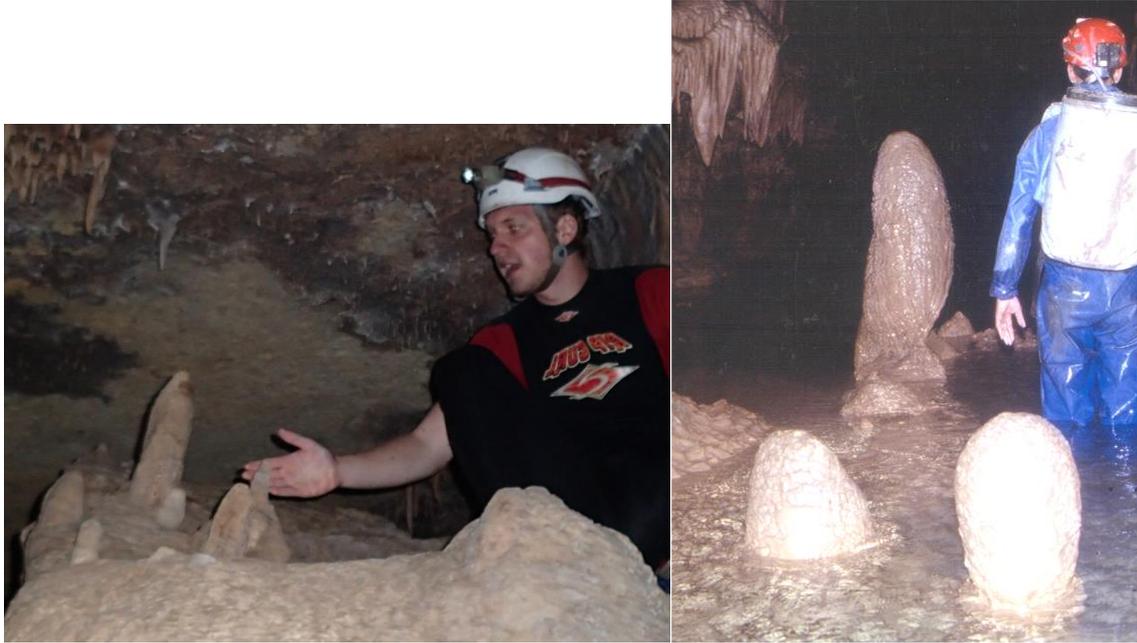


Image11&12 : Des stalagmites de Win Timdouine.

Chaque stalagmite doit être couplée d'une stalactite dans un paysage très magnifique au moins dans les photos et films documentaires en raison de l'obscurité absolue des grottes, quand l'éclairage du spéléologue ne suffit que d'éclairer un cercle très limité devant lui.

▪ **Les Colonnes :**

La stalactite continue à évoluer vers le bas, et dans le sens inverse la stalagmite suit son évolution vers le haut dans une évolution extrêmement lente... après un certain période (plusieurs milliers d'années) la stalactite rejointe « sa sœur » la stalagmite pour donner une colonne unifiée (voir les images 13 et 14).

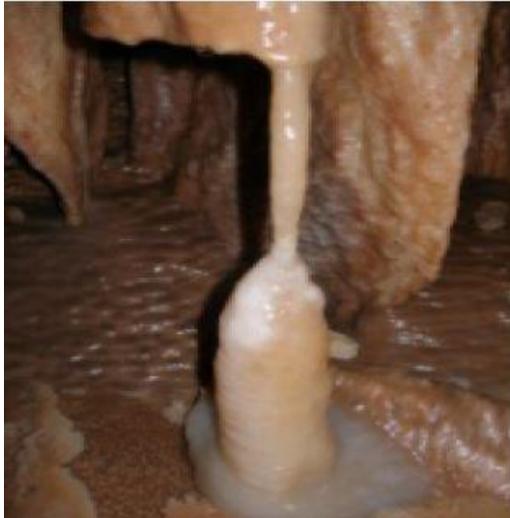


Image13&14 : Formation d'une colonne par jonction de stalagmite et stalactite.

▪ **Les draperies :**

Lorsque la grotte représente un plafond relativement pentu, la formation d'une stalactite se suit en deux dimensions vers le bas et suivant la pente. En effet, les stalactites ici donnent des draperies fins en extension et continues en longueur et profondeur, parfois transparents avec des jolies couleurs selon leurs compositions minéralogiques : ocre, rouge, et rose sont des couleurs du fer (images suivantes).



Image15, 16&17 : Draperies de plusieurs formes (Mars 2014, et Bouchaou et Beraaouz, 2011).

▪ **Les gours :**

Sont des endroits creux dans le réseau souterrain, qui contient de l'eau permanente. Retenue par une digue qu'elle a elle-même formée par la cristallisation des minéraux de calcite sur les bords en formant une barrière fermée sur elle-même, constituée de rhomboèdres (système géométrique de cristallisation) de calcite. On peut rencontrer des gours de toute taille, depuis les micro-gours, jusqu'aux lacs sous forme de gours.

▪ **Les disques et marmites :**

Les disques de calcite se forment au plafond des grottes. Ce sont des concrétions plates et circulaires de diamètres décimétriques à métriques, d'orientation quelconque, toujours fixées par une de leurs bordures. Sous l'effet de la gravité, leur poids les fait chuter du plafond et on les retrouve sur le sol de la grotte.



Image18&19 : Images des marmites et disques (Mars 2014, et Bouchaou et Beraaouz, 2011).

▪ **Autres merveilles :**

En fait, ces merveilles décrites ci-dessus ne représentent que peu d'exemples de la réalité d'une grotte de telles caractéristiques comme Win Timdouine la plus longue grotte connue en Afrique (19Km de galeries). En réalité le brusque changement dans l'équilibre chimique provoque la précipitation des carbonates de calcium sous divers formes, dont on ne peut pas les limiter dans les six exemples précédemment cités...

b. Les formes exo-karstiques :

Sont des formes karstiques superficielles, qui comprennent : les travertins, les lapiez, les dolines, les vallées sèches, ...

▪ **Les travertins :**

Les formations de travertins (tufs calcaires) sont très abondantes dans le site de WT, et tapissent les falaises de calcaires dolomitiques du jurassique au niveau des chutes d'eau ou de sources (image suivante).



Image20 : Travertins avec écoulement des eaux uniquement en période pluvieuse.

▪ **Les lapiez :**

Le plateau du Tasroukht est très riche en Lapiez, ils s'agissent des formes ouvertes, produites par l'érosion hydrique en suivant des diaclases parallèles à la ligne de plus grand pente, de profondeur de quelque centimètres (image ci-dessous).



Image21 : Lapiez du plateau de Tasroukht (Mars 2014).

▪ **Les dolines :**

Ce sont des dépressions fermées allant de quelques mètres de diamètre à des centaines de mètres (Poljés). Leur formation est liée à l'évolution d'un trou absorbant puis un affaissement rapide de la roche (voir figure 15). Souvent le fond des dolines est tapissé d'argiles de décalcification (*terra rossa*) provenant du fait que les calcaires contiennent un

certain pourcentage d'argiles. Ces dépressions tapissées d'argiles et colmatées constituent les seuls champs de culture et donnent naissance parfois à des lacs en pays calcaire.

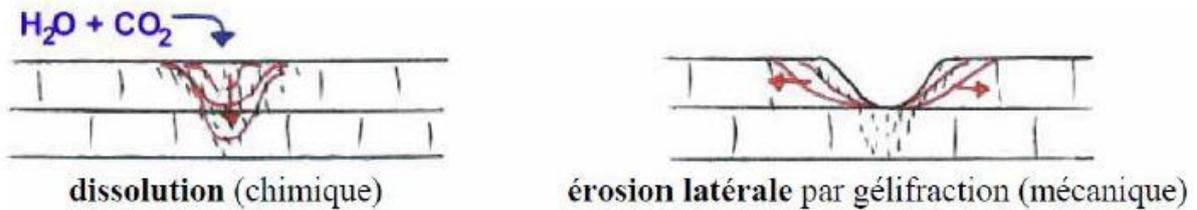


Figure15 : Etapes de formation d'une doline.

Le plateau de Tasroukht est plein des dolines en nombre dénombrable, précisément, au-dessus du réseau karstique Win Timdouine d'une manière montre la relation étroite entre les formes exo-karstiques et la cavité interne (voir l'image 21).



Image22 : Doline dans le plateau de Tasroukht d'environ 10m de diamètre (Mars 2014).

▪ Les avens :

Connue aussi par trous absorbants ou encore puits naturels. Ils constituent des points de perte des eaux de surface et jouent un rôle important dans le développement des réseaux souterrains en drainant les eaux météoriques vers la cavité souterraine. Ces avens drainent également les matières en suspension (en raison de leurs ouvertures importantes) lors des événements pluvieux ce qui rend troubles les eaux de sources (voir les images correspondantes).



Image23&24 : Exemples des avens du site Win Timdouine (Mars 2014).

▪ **Les vallées sèches :**

Comme leur nom l'indique, sont des vallées des régions karstiques où les eaux de pluies s'infiltrent généralement en entière, au niveau des dolines, puits absorbants, et fuites d'eau vers le réseau souterrain. Or, les vallées, ou plutôt les anciennes vallées ne gardent de leur fonction que le nom.

Il y a une vallée sèche à l'Est de la Grotte Win Timdouine, si on monte vers le plateau par le chemin non goudronné, on l'observe à droite tout au long du chemin entre la formation N°5 et le terrasse du plateau.

La coupe suivante (figure ci-après) donne la position du réseau karstifié de Win Timdouine dans son contexte géomorphologique (voir la figure 16).

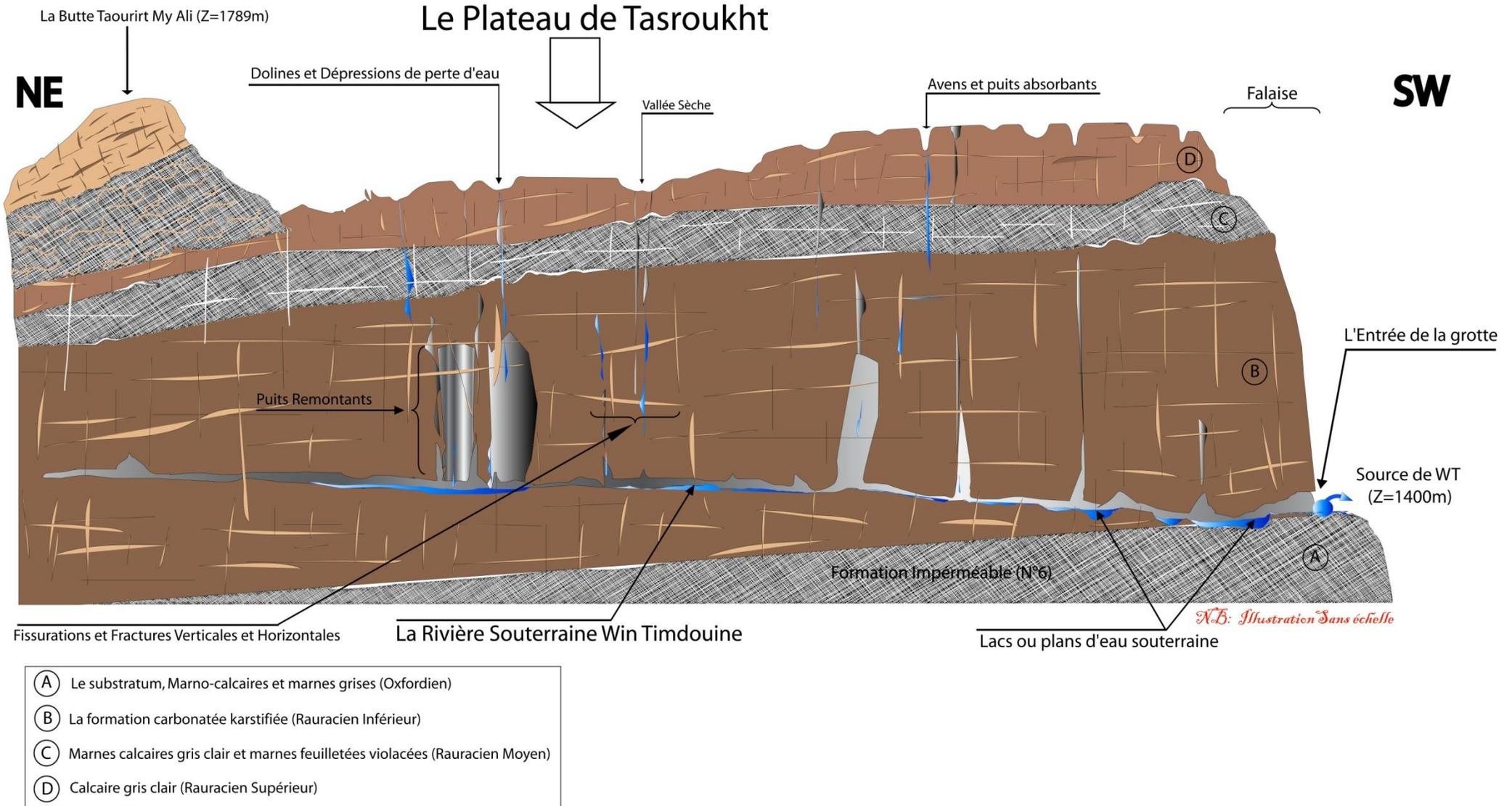


Figure16 : Schéma illustre le réseau souterrain Win Timdouine dans son contexte géomorphologique.

4. Cartographie de la grotte

Le plan du réseau karstique réalisé à l'aide des relevés de Trillo et al. (1981, et 2002) ainsi que des données des spéléologues de l'ASA et l'ASS, est présentée dans la figure 17.

Cette carte donne la représentation simplifiée du réseau souterrain Win Timdouine, depuis l'entrée de la grotte (0m) jusqu'au dernier point exploré à nos jours la Puerta d'Alcala (7297m) à l'Est de la source WT, en localisant les points les plus importants (les premiers lacs, le Comptoir, le Balcon, le Studio, le Métro, la Grande salle, la Puerta d'Alcala, etc). En plus d'un agrandissement détaillé de l'entrée de la grotte jusqu'au deuxième lac.

Carte donne la représentation simplifiée du réseau souterrain Win Timdouine (Haut Atlas Atlantique, Agadir, Maroc), Trillo et al. (1981, et 2002) et des données des spéléologues de l'ASA et l'ASS (modifiée par EZINI E.A., 2014)

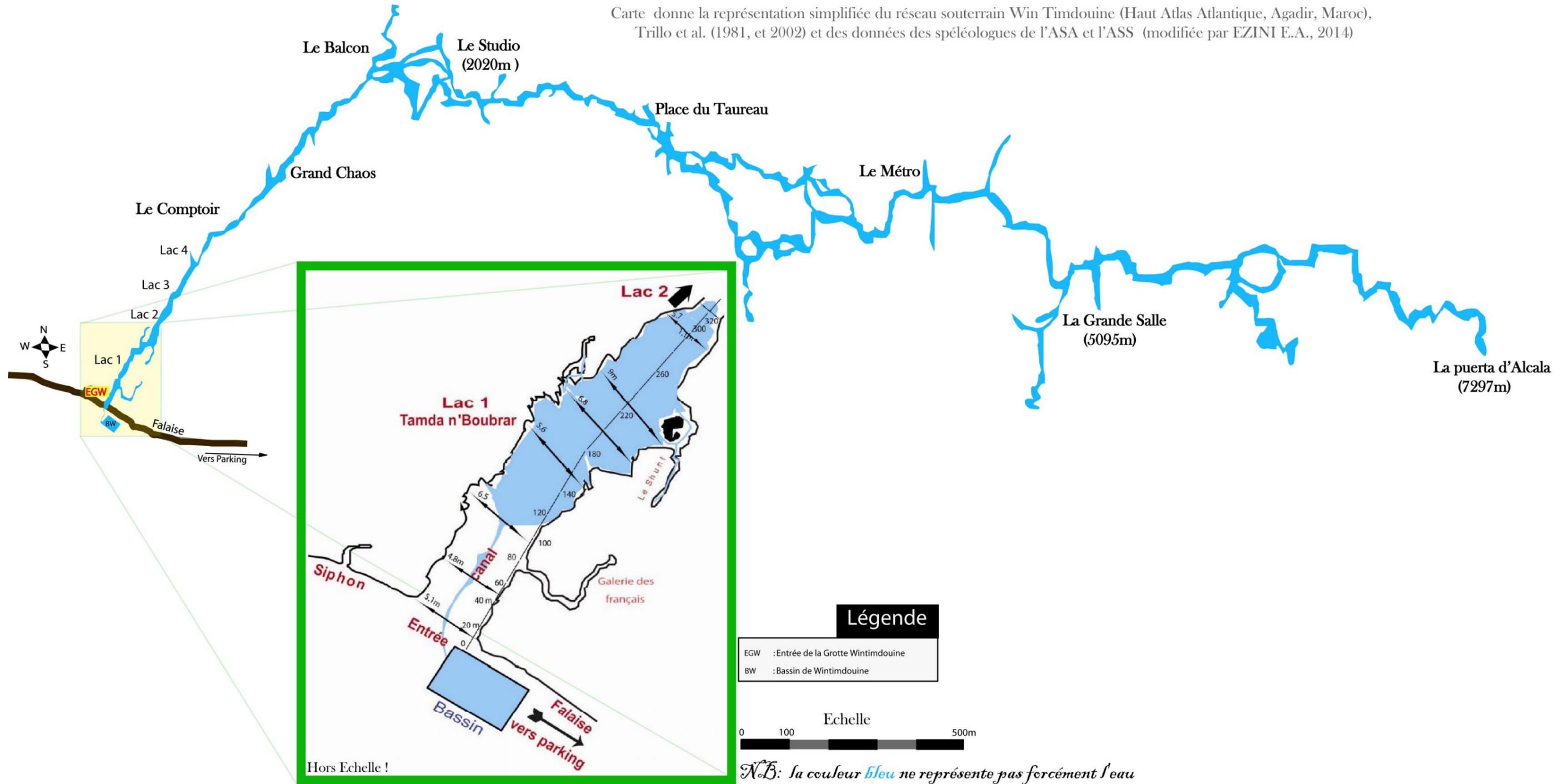


Figure17 : Carte simplifiée, de la rivière souterraine de Win Timdouine à Tazentoute (Haut Atlas Atlantique, Agadir, Maroc).

CHAPITRE IV : APPROCHE HYDROCHIMIQUE DE WIN TIMDOUINE

Nous avons analysé 19 échantillons, dont 10 de Tazentoute, et le reste d'Assaka (N°10, 11, 12, 13 et 14), Tanit (N°15 et 16) et Aguerd (N°17 et 18). Les résultats des analyses sont présentés dans les tableaux suivants. Cependant, les interprétations détaillées seront focalisées notamment sur les trois sources qui concernent l'objectif de ce mémoire (voir la carte ci-après) :

1. La source Tamlalt (au pied de Taourirt My Ali sur le plateau) ;
2. La source Win Timdouine (à la base de la falaise du plateau de Tasroukht), et sa grotte (à l'intérieur) ;
3. Et la source de Tanguit (au contrebas de Win Timdouine vers l'Est, au voisinage du village Tizgui N Chorfa).

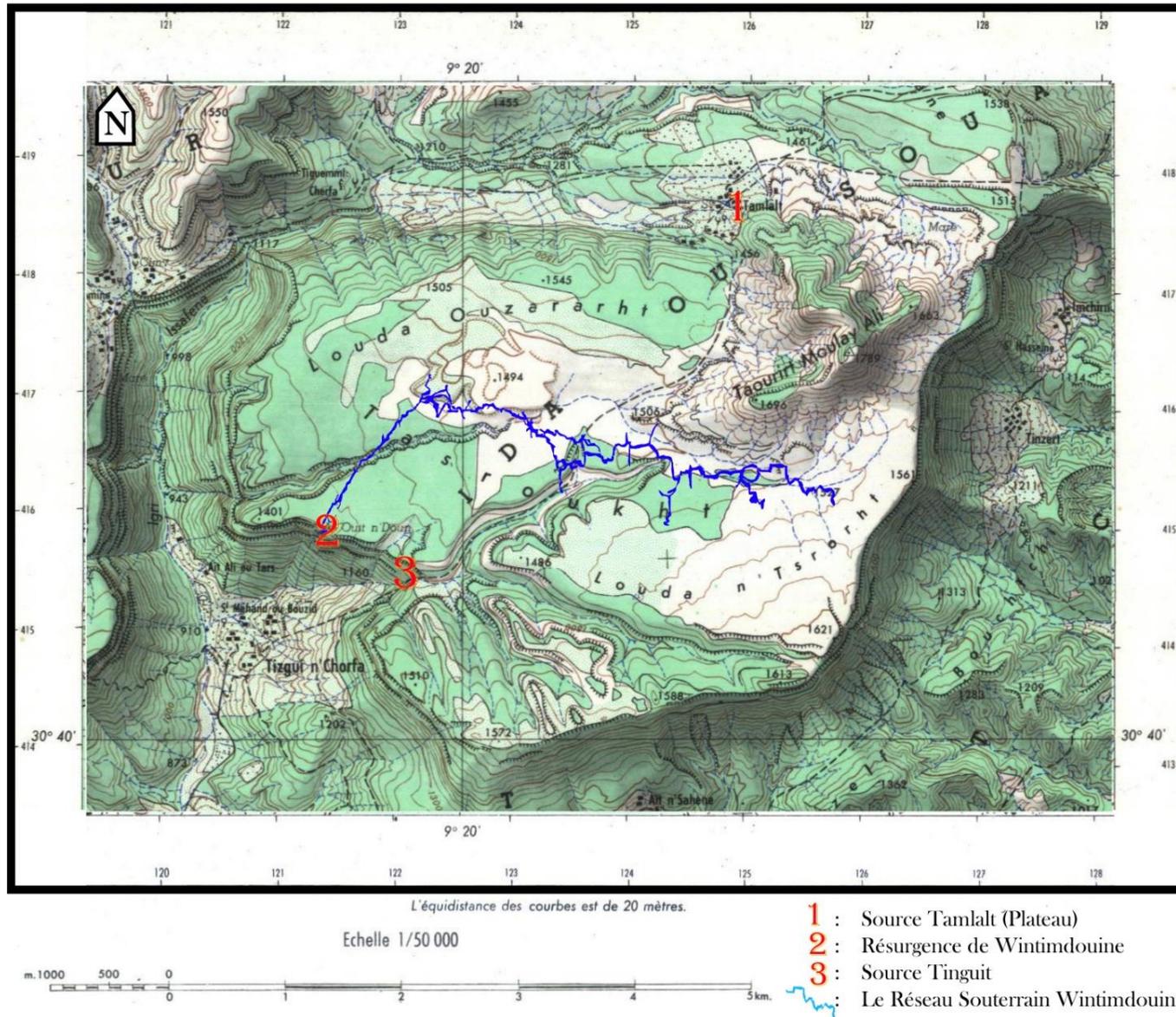


Figure18 : Extrait de la carte topographique d'Imouzer des Ida Ou Tanane, pour le plateau de Tasroukht et les trois sources identifiées.

L'objectif de cette étude hydrogéochimique est de caractériser les eaux des points d'eaux échantillonnés et de chercher la relation qui existe entre la géologie et l'hydrochimie.

La première partie concerne l'hydrochimie élémentaire des eaux :

- Les caractéristiques physico-chimiques (Température, pH, et Conductivité Electrique) de tous les échantillons ;
- Caractérisation chimique des eaux (éléments majeurs) ;
- Et la détermination des faciès chimiques.

La deuxième partie porte sur l'étude isotopique des eaux de la rivière souterraine Win Timdouine, depuis la résurgence jusqu'au 5^{ème} lac, afin de discuter l'origine de cette eau en se basant sur les rapports des deux isotopes stables de la molécule d'eau : Deutérium (²H) et l'Oxygène 18 (¹⁸O).

1. Hydrochimie élémentaire

a. Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Les données enregistrées lors des campagnes de mesures au niveau du site Win Timdouine sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau3 : Paramètres physico-chimiques des eaux de la région de Tazentoute, Assaka, Tanit et Aguerd.

Ordre	Description	T (°C)	CE [μ s/cm]	pH
1	Source Tamlalt, (Plateau)	15,9	1318	7,2
2	Résurgence de Win Timdouine	12,5	401	8,34
3	Source Tanguit	14	1333	8,18
4	Puits Tizgui'N'Chorfa	20,8	1266	7,8
5	Vallée de Tamraght	19,4	1238	7,94
6	Puits1 Tazantoute (Asofid)	21,9	1104	7,46
7	Puits2 Tazentoute (Tinfid)	19,7	1420	7,5
8	Source Tazentoute (Tinfid)	19,7	935	8,06
9	Source2 Sud Tazentoute (sur la route)	18,7	475	7,75
10	Forage d'Assaka	21,4	1214	7,71
11	Puits1 d'Assaka (Bahaj)	20,9	1086	7,15
12	Puits2 d'Assaka (Agricole)	20,7	1180	7,42
13	Puits3 d'Assaka (Talalt Melouene)	24,2	1193	7,61
14	Source Tirhanimine (Brahim O ali)	17,4	808	8,34
15	Source2 Tanit (Oumlalal)	24,3	619	7,19
16	Source3 Tanit (Ouzid)	19,3	1101	8,09
17	Puits Aguerd	21,6	1953	6,97
18	Source Ighzrounifis (SW d'Aguerd)	24,3	670	7,64
	Moyenne	19,81	1073	7,68
	Maximum	24,3	1953	8,34
	Minimum	12,5	401	6,97

▪ La Température

La température des eaux des échantillons étudiés est comprise entre 12,5°C et 24,3°C. La valeur la plus basse est rencontrée au niveau des eaux de la grotte de Win Timdouine, due effectivement à l'environnement interne de la grotte relativement froid. La valeur maximale est mesurée au niveau des sources Oumlalal et Ighzrounifis respectivement à Tanit et Aguerd qui se situent loin de Win Timdouine vers le SW (plus de 18km). La moyenne est de 19,8°C en dépassant la température de l'air de la région de deux degrés environ (voir figure ci-dessous).

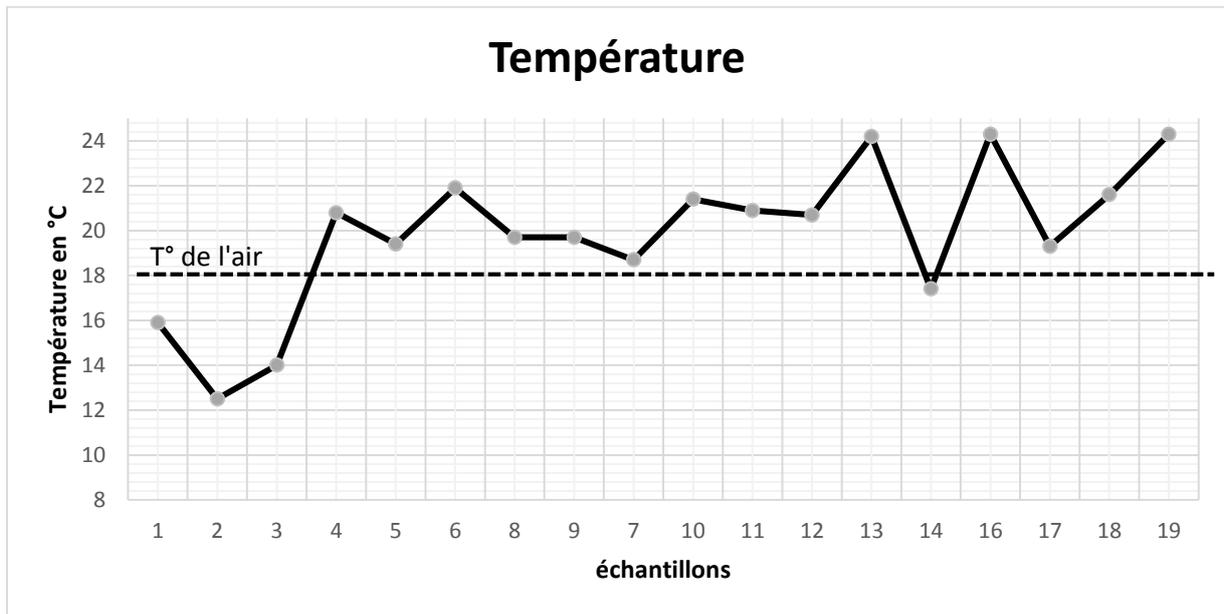


Figure19 : Représentation graphique, de l'évolution spatiale de la température des échantillons étudiés depuis le plateau de Tasroukht (1) jusqu'au village Aguerd (18=source Ighzrinifis).

▪ Le potentiel de l'ion Hydrogène (pH)

La moyenne du pH des eaux étudiées est 7.68 avec un maximum de 8.34 pour la résurgence de Win Timdouine et la source Tirhanimine, et un minimum de 6,97 au niveau du puits Aguerd. La moyenne de l'acidité (pH) montre une eau conforme aux normes (OMS2011 : pH=6,5 à 8,5). Le pH des échantillons étudiés est très hétérogène spatialement (voir figure ci-après). Selon les normes marocaines ces eaux font partie de la catégorie A1.

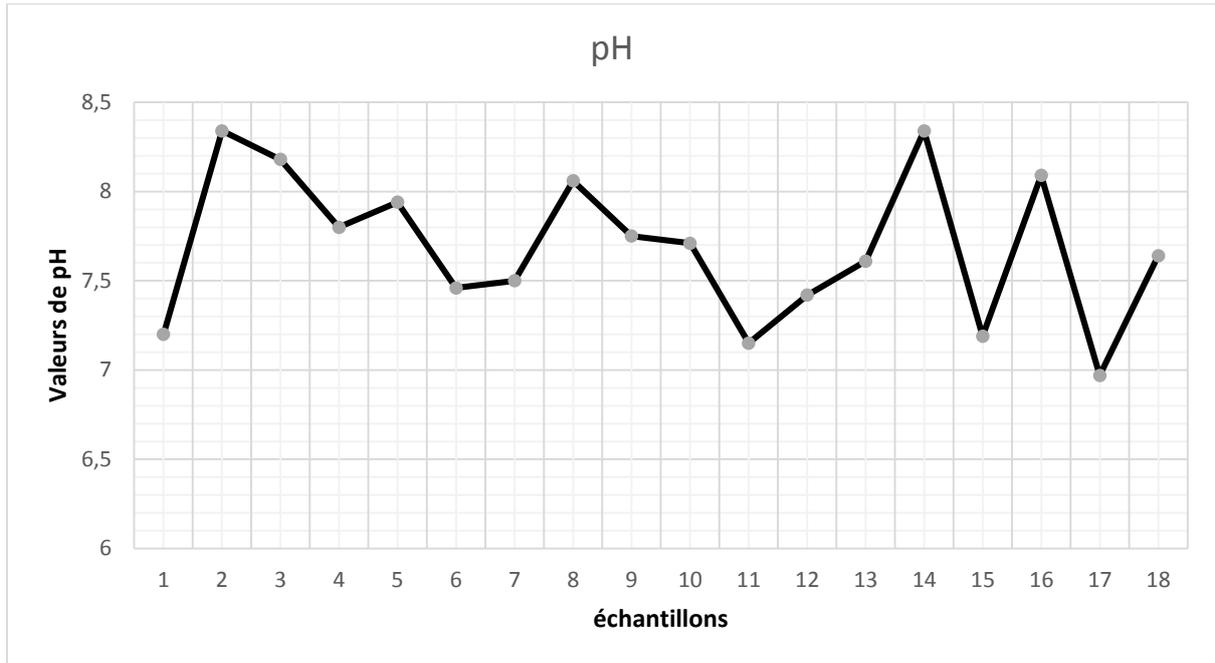


Figure20 : Graphique montre la variation et l'hétérogénéité du pH des eaux de la zone étudiée.

▪ La Conductivité Electrique (CE)

Les eaux étudiées sont relativement plus minéralisées, à l'exception de quatre exemples : Win Timdouine (401 μ s/cm), Source2 au Sud de Tazentoute (475 μ s/cm), Source Oumlalal de Tanit (619 μ s/cm), et Source Ighzrounifis à l'extrémité SW de la zone étudiée (670 μ s/cm). Ces valeurs se situent dans la marge inférieure des normes de potabilité selon l'OMS 2011 (CE= 180 μ s/cm), tandis que les sources Tazentoute (Tinfite) et Source Tirhanimine (Brahim O Ali) ont des valeurs proches de la limite supérieure de la potabilité OMS 1000 μ s/cm. Les autres échantillons dépassent ces normes et vont de 1086 μ s/cm (puits1 Assaka) à 1953 μ s/cm (puits Aguerd). Sur toute la zone affectée par l'étude, la CE connait une irrégularité et hétérogénéité spatiale en gros depuis le plateau de Tasroukht (source Tamlalt N°1) jusqu'au Aguerd (N°17-18) (voir figure ci-dessous). Selon les normes marocaines ces eaux ont une qualité bonne (entre 400 et 1300 μ s/cm) à moyenne (entre 1300 et 2700 μ s/cm) en termes de CE.

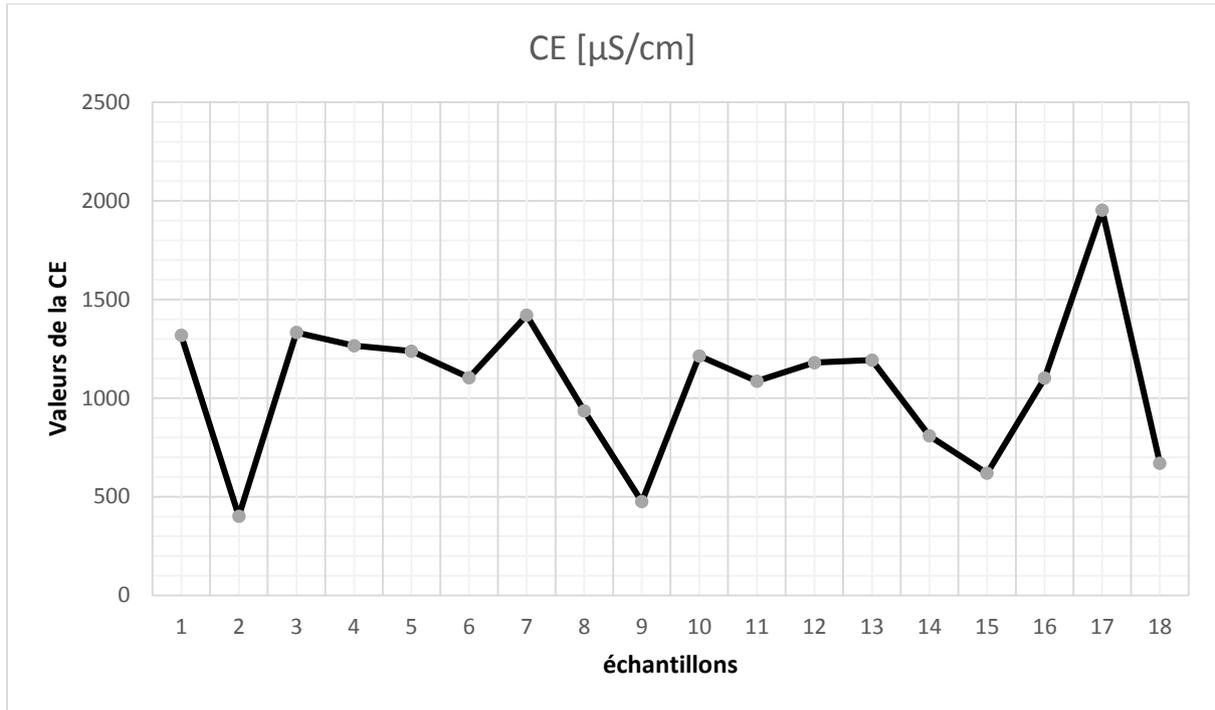


Figure 21 : Représentation de la variation spatiale de CE pour les échantillons étudiés.

➤ La source Tamlalt

Se trouve en Haut de Win Timdouine, dans le plateau de Tasroukht à une altitude d'environ 1456m. Celle-ci représente la principale source d'alimentation en eau potable pour les habitants du village Tamlalt.

La température des eaux est inférieure à la moyenne des eaux étudiées, elle égale 15.9°C. Elle a une valeur moyenne en termes de conductivité électrique (1318µs/cm), cette valeur est non conseillée pour une eau destinée à la consommation humaine (entre 180 et 1000µs/cm selon l'OMS 2011).

Le pH de cette source est égal à 7,2 conforme aux normes de l'OMS2011 comme la moyenne de toutes les eaux étudiées (entre 6,5 et 8,5).

➤ La source Win Timdouine

Représente l'objectif proprement dit de ce mémoire. Elle se trouve à l'altitude Z=1400m vers la base de la falaise carbonatée (formation N°5) dans la coupe discutée plus haut (figure 8). Elle est comprise géographiquement entre les deux sources Tamlalt en haut et Tanguit en bas. Son eau est la plus froide (12,5°C) sur toute la série depuis le plateau jusqu'au Aguerd. Elle possède une eau de qualité excellente en termes de minéralisation (CE= 401µs/cm). L'eau de Win Timdouine est utilisée pour la consommation humaine et pour l'irrigation par la population environnante.

➤ **La source Tanguit**

Localisée dans le ravin Sud, à côté du chemin qui mène à la grotte, entre cette dernière et son parking.

Son eau est plus chaude que celle de Win Timdouine (14°C), son pH est de 8,18. Elle est considérée comme la source la plus minéralisée parmi les trois (CE=1333µs/cm).

Elle n'a qu'une importance moindre en raison de son débit faible, en effet, elle tarit en période de sécheresse. Son eau s'écoule dans l'oued pour rejoindre un petit bassin à sa rive gauche à quelques dizaines de mètres. Elle est utilisée par quelques agriculteurs du village Tizgui N'Chorfa.

b. Caractérisation chimique des eaux

Nous avons tenu compte les paramètres chimiques suivants :

- Cations : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et K^+ ;
- Anions: HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- ;
- En plus des éléments mineurs et traces (Fe, Mn, Sr, PO_4 , SiO_2 , et NH_4).

i. Les éléments majeurs

Ce tableau englobe les résultats obtenus pour l'analyse des éléments majeurs :

Tableau4 : Les résultats d'analyses des éléments majeurs de l'eau, pour tous les échantillons. B.I : la Balance Ionique.

Ordre	Description	HCO3 (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	B.I
1	Source Tamlalt, (Plateau)	379.25	166.00	78.00	15.50	4.60	19.53	498.13	11.62	-5%
G	La grotte WT (1 ^{er} lac)	170,80	42,40	22,56	2,00	0,90	14,20	44,13	12,22	-3%
2	Résurgence de Win Timdouine	195.74	50.00	24.50	4.70	1.50	14.20	33.60	10.79	+3%
3	Source Tanguit	269.15	135.40	72.00	45.10	7.20	26.79	441.87	2.84	+2%
4	Puits Tizgui'N'Chorfa	318.08	143.00	72.50	38.40	4.70	31.75	454.40	0.00	-2%
5	Vallée de Tamraght	281.38	163.00	65.80	23.50	4.40	12.16	441.11	0.00	+2%
6	Puits1 Tazantoute (Asofid)	526.06	116.00	75.50	27.90	2.60	24.98	218.88	16.89	-3%
7	Puits2 Tazentoute (Tinfid)	330.32	132.00	117.00	16.10	1.20	15.28	274.46	20.79	+18%
8	Source Tazentoute (Tinfid)	195.74	113.00	44.40	10.00	1.20	9.02	317.96	4.39	-2%
9	Source2 Tazentoute (sur la route)	269.15	45.70	25.70	12.20	1.20	12.41	8.73	4.98	+1%
10	Forage d'Assaka	367.02	152.00	65.70	19.90	3.10	14.80	366.04	5.48	+0%
11	Puits1 d'Assaka (Bahaj)	360.90	119.10	52.50	23.90	3.10	13.00	232.34	5.09	+1%
12	Puits2 d'Assaka (Agricole)	305.85	148.00	53.70	16.80	3.00	13.09	373.79	4.01	-2%
13	Puits3 d'Assaka (Talat Melouene)	342.55	143.30	60.90	18.00	3.20	15.70	375.24	0.00	-3%
14	Source Tirhanimine (Br. O ali)	244.68	70.00	52.20	18.10	3.30	17.94	94.62	12.71	+13%
15	Source2 Tanit (Oumlalal)	330.32	84.30	29.40	7.50	1.90	10.14	61.50	2.85	+0%
16	Source3 Tanit (Ouzid)	281.38	129.00	63.30	26.50	4.80	11.35	332.31	0.00	+5%
17	Puits Aguerd	311.97	309.00	98.80	33.40	6.90	29.12	918.59	0.01	+1%
18	Source Ighzrounifis (SW Aguerd)	269.15	76.30	34.90	14.30	2.30	10.23	80.39	0.73	+7%
	Moyenne	302,61	123,03	58,39	19,67	3,22	16,61	293,06	6,08	
	Max	526,06	309,00	117,00	45,10	7,20	31,75	918,59	20,79	
	Min	170,80	42,40	22,56	2,00	0,90	9,02	8,73	0,00	

La critique des données a été effectuée à l'aide de la **balance ionique**. En effet, chaque échantillon devait raisonnablement répondre à la loi d'électroneutralité selon laquelle : **la somme des cations (+) = la somme des anions (-)**

Le bilan ionique a été défini par la loi de Schoeller (1962) :

$$BI = \frac{(\sum \text{cations} - \sum \text{anions})}{(\sum \text{cations} + \sum \text{anions})} \times 100$$

Avec : cations et anions exprimés en (méq/l)

- **BI < | 5% |** : résultats de bonne qualité ;
- **| 5% | < BI < | 10% |** : résultats d'une qualité admissible ;
- **BI > | 10% |** : résultats de mauvaise qualité.

Les résultats de cette étude ont pour la majeure partie (16 échantillons) une bonne qualité (BI entre -5 et +5%), l'échantillon N°18 d'une qualité admissible, et deux anomalies représentent des mauvaises qualités de mesure (l'échantillon 7 de balance ionique = +18%, et l'échantillon 14 de BI = +13%), avec la dominance des cations sur les anions. Cette anomalie signale une erreur lors des dosages. Cette erreur est due soit à l'opérateur lui-même, soit à la méthode de manipulation, sinon aux éléments mineurs d'une importance, non pris en compte.

La moyenne des valeurs montre que les bicarbonates sont les éléments les plus dominants suivis par les sulfates, le calcium, le magnésium, le sodium, les chlorures, les nitrates, et le potassium. La figure ci-dessous représente la représentativité de chaque élément (en moyenne) parmi les éléments majeurs dans les eaux de Tazentoute, Assaka, Tanit et Aguerd, des échantillons 1 à 18 sauf l'échantillon de la grotte (voir figure en secteur ci-dessous).

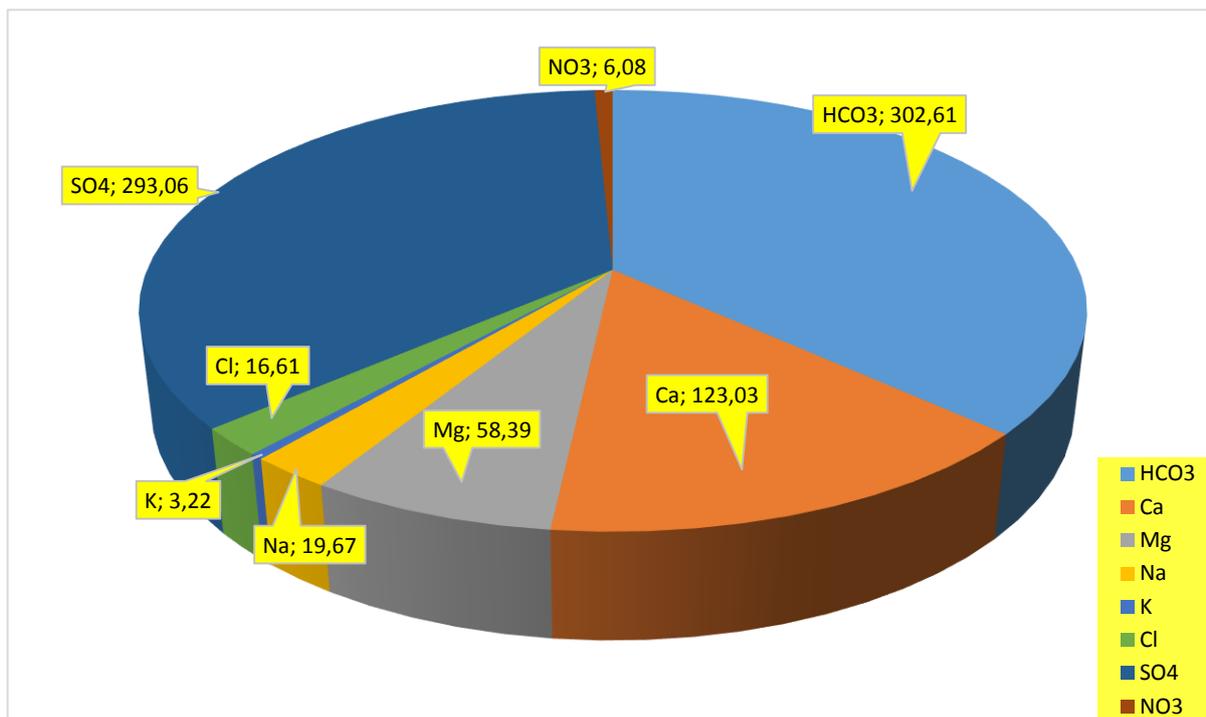


Figure22 : Répartition de la représentativité de la teneur moyenne en chaque élément à l'échelle de la région (valeurs en mg/l).

Interprétation des données :

Les normes de l’OMS 2011 pour une eau potable sont regroupées dans le tableau qui suit.

Les moyennes des éléments majeurs mesurés pour les eaux de Tazentoute, Assaka, Tanit et Aguerd, sont généralement conformes aux normes établies par l’OMS en 2011. En gros ces moyennes sont aussi conformes aux normes marocaines, en termes des nitrates elles ont une qualité bonne (entre 5 et 25mg/l).

Des eaux avec ces caractéristiques ne causent aucun problème pour l’irrigation en fait.

Dans les détails, le puits Aguerd (N°17) possède une concentration maximale en sulfate (918.59mg/l), ainsi qu’en calcium (309mg/l). En réalité la qualité de l’eau de ce puits (Aguerd) doit subir un contrôle de la part des autorités responsables, car sa minéralisation est la plus élevée observée (CE=1953µs/cm). Les normes

Tableau5 : Normes de potabilité selon l’OMS 2011.

Paramètres physicochimiques	Unités	Normes OMS 2011
Température	°C	
pH		6,5-8,5
Conductivité	µS/cm	180-1000
Chlorures	mg L ⁻¹	≤ 250
Sulfates	mg L ⁻¹	≤ 250
Silices	mg L ⁻¹	≤ 10
THT	°F	10
Fer total	mg L ⁻¹	≤ 0,3
Manganèse	mg L ⁻¹	≤ 0,1
Aluminium	mg L ⁻¹	≤ 0,2
Nitrates	mg L ⁻¹	≤ 50
Phosphates	mg L ⁻¹	≤ 0,5
Sodium	mg L ⁻¹	≤ 200
Potassium	mg L ⁻¹	≤ 12

marocaines comme celles de l’OMS, n’acceptent pas une eau de ces caractéristiques en tant qu’une eau potable.

Tableau6 : Grille simplifiée des normes marocaines pour les eaux souterraines.

Paramètre de qualité	Cond (µs/cm)	Cl- (mg/l)	NO3- (mg/l)	NH4+ (mgNH4+/l)	MO (mgO2/l)	CF (UFC/100ml)
Excellente	<400	<200	<5	≤0,1	<3	≤20
Bonne	400-1300	200-300	5-25	0,1-0,5	3-5	20-2000
Moyenne	1300-2700	300-750	25-50	0,5-2	5-8	2000-20000
Mauvaise	2700-3000	750-1000	50-100	2-8	>8	>20000
Très mauvaise	>3000	>1000	>100	>8	-	-

ii. Eléments mineurs et traces

Le tableau suivant englobe les résultats des éléments mineurs et traces disponibles, analysés à l’Université Allemande Bonn :

Tableau7 : Les éléments mineurs et traces disponibles.

Ordre	Description	Fe	Mn	Sr	Phosphate	Silicates	Ammonium
1	Source Tamalt, (Plateau)	<0,005	<0,005	6,30	0,04	2,81	0,04
2	Résurgence de Win Timdouine	<0,005	<0,005	0,60	0,03	4,64	0,04
3	Source Tanguit	<0,005	<0,005	3,30	0,02	3,82	0,07
4	Puits Tizgui'N'Chorfa	0,01	<0,005	3,00	0,02	3,61	0,06
5	Vallée de Tamraght	<0,005	<0,005	3,20		2,73	0,07
6	Puits1 Tazantoute (Asofid)	<0,005	<0,005	1,80	0,02	4,94	
7	Puits2 Tazantoute (Tinfite)	<0,005	<0,005	0,70	0,02		0,07
8	Source Tazantoute (Tinfite)	<0,005	<0,005	3,50		2,34	0,06
9	Source2 Sud Tazantoute (sur la route)	<0,005	<0,005	0,70		2,38	0,05
10	Forage d'Assaka	0,01	<0,005	4,00	0,02	3,57	0,04
11	Puits1 d'Assaka (Bahaj)	0,01	0,02	2,70	0,07	3,67	0,05
12	Puits2 d'Assaka (Agricole)	<0,005	<0,005	2,80	0,04	3,17	
13	Puits3 d'Assaka (Talt Melouene)	<0,005	<0,005	3,30	0,02	2,68	
14	Source Tirhanimine (Brahim O ali)	<0,005	<0,005	2,20		2,88	0,10
15	Source2 Tanit (Oumlalal)	<0,005	<0,005	<0,5	0,02	1,83	0,05
16	Source3 Tanit (Ouzid)	<0,005	<0,005	3,10		3,08	0,05
17	Puits Aguerd	<0,005	0,01	6,70	0,02	3,19	0,07
18	Source Ighzrounifis (SW d'Aguerd)	<0,005	<0,005	1,10	0,02	2,27	0,07

Les résultats d’analyse de ces éléments montrent que l’eau de la région ne présente actuellement aucun risque d’anomalie. En effet les valeurs trouvées, pour la majorité des éléments (surtout le Fer, le Manganèse et les phosphates) sont inférieures aux normes de plus de 10 fois.

c. Détermination des Faciès chimiques

Le diagramme triangulaire de Piper ci-dessous montre les faciès chimiques des échantillons étudiés (Tazantoute, Assaka, Tanit et Aguerd) d’après leurs compositions chimiques (figure ci-dessous).

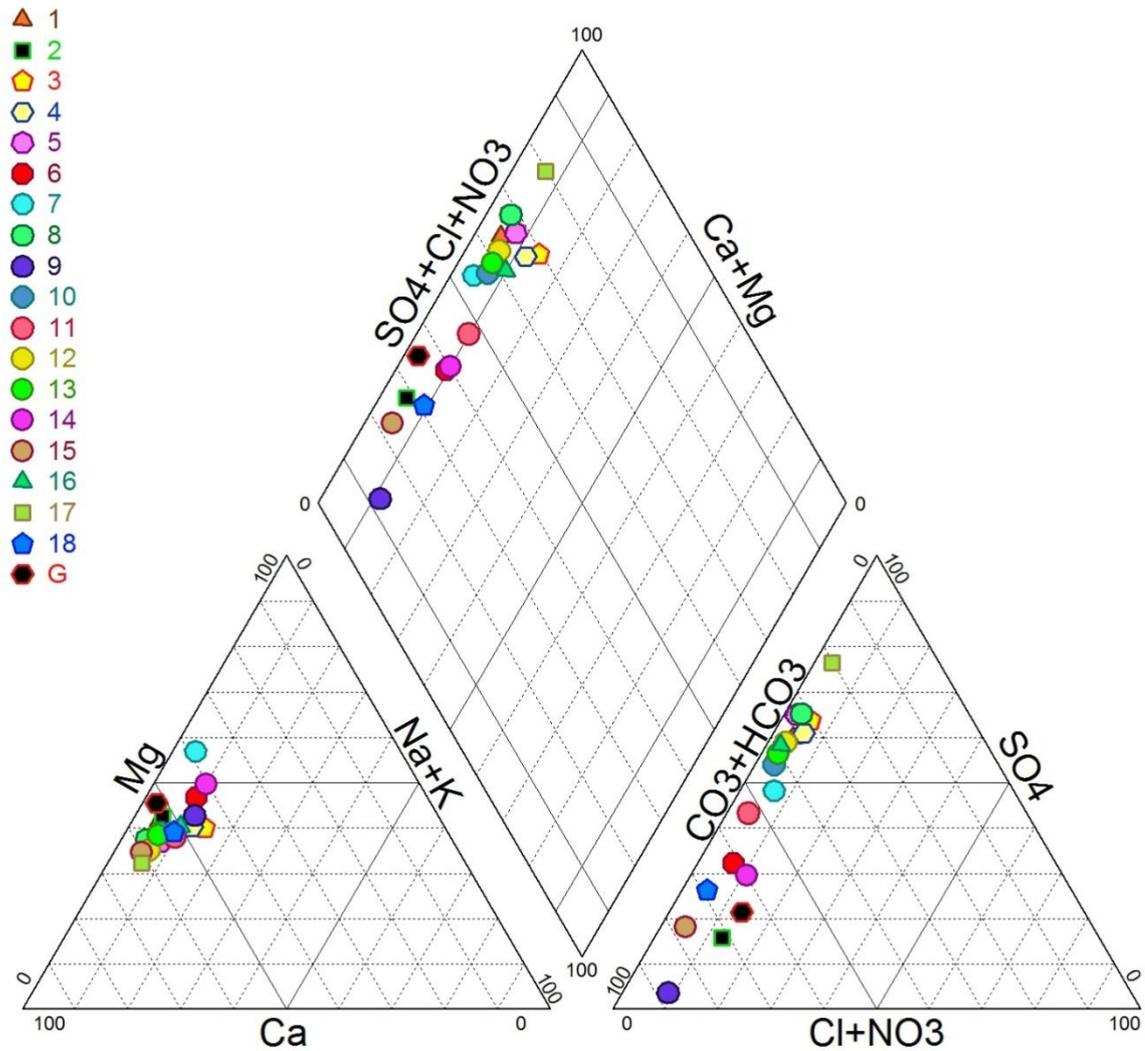


Figure23 : Diagramme triangulaire de Piper pour les eaux de Tazentoute, Assaka, Tanit et Aguerd.

Les échantillons étudiés se répartissent suivant deux faciès chimiques majeurs, qui sont :

- ❖ **Faciès chloruro-sulfaté calcique-magnésien (FCSCM) ;**
- ❖ **Faciès Bicarbonaté-calcique et magnésien (FBCM).**

Le faciès le plus dominant dans la région étudiée (Tazentoute, Assaka, Tanit et Aguerd), est le faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien d'un pourcentage de 57,89% (11 échantillons). 54.54% de ce faciès sont des échantillons (6 points) collectés à Tazentoute, entre le plateau de Tasroukht et le village Tinfitt, 45.45% représente les cinq autres points d'échantillonnage pour Assaka, Tirhanimine, Tanit et Aguerd.

Le Faciès Bicarbonaté calcique et magnésien, à son tour, occupe 42,1% sur tous les points étudiés. Ce faciès est distribué entre Tazentoute et les autres villages au SW d'une manière homogène 50% pour Tazentoute (4 échantillons) et 50% pour Assaka, Tanit et Aguerd.

Sur le diagramme de Piper ci-dessus, on remarque que les échantillons sont trop condensés pour le 1^{er} faciès à l'exception de l'échantillon N°17 (Puits Aguerd) qui migre vers le pôle Hyper-chloruré calcique/Hyper-sulfaté calcique. Cependant, le 2^{ème} faciès (FBCM) montre une dispersion des points suivant l'axe des SO₄+Cl+NO₃, le point le plus éloigné est celui de l'échantillon N°9. Cet échantillon est le plus appauvri au niveau des sulfates, nitrates et chlorures, il est plus proche au faciès Bicarbonaté calcique. L'échantillon N°11 (puits1 d'Assaka, Bahaj) est plus rapproché du 1^{er} faciès FCSCM.

Le bilan extrait de ce diagramme triangulaire c'est que la totalité des échantillons étudiés sont, relativement pauvres en sodium-potassium, très pauvres en nitrates et chlorures, riche en calcium et magnésium et très riche en sulfates et bicarbonates. L'agencement global des échantillons dans ce diagramme varie selon leurs teneurs en sulfates et bicarbonates. Ils font une ceinture allongée entre les deux pôles anioniques dominants : 100% Sulfates-0% Bicarbonates, et 100% Bicarbonates-0% Sulfates, en gardant un pourcentage cationique entre 85 et 95% (Ca-Mg) et entre 5 et 15% (Na-K).

Pour le Calcium et le Magnésium en vue de leur importance pour le corps humain, et leur effet sur la qualité de l'eau (dureté total), la figure qui suit représente la fonction $Ca=f(Mg)$ pour avoir une idée sur la teneur (en mg/l) de chacun d'eux par rapport à l'autre dans la région étudiée.

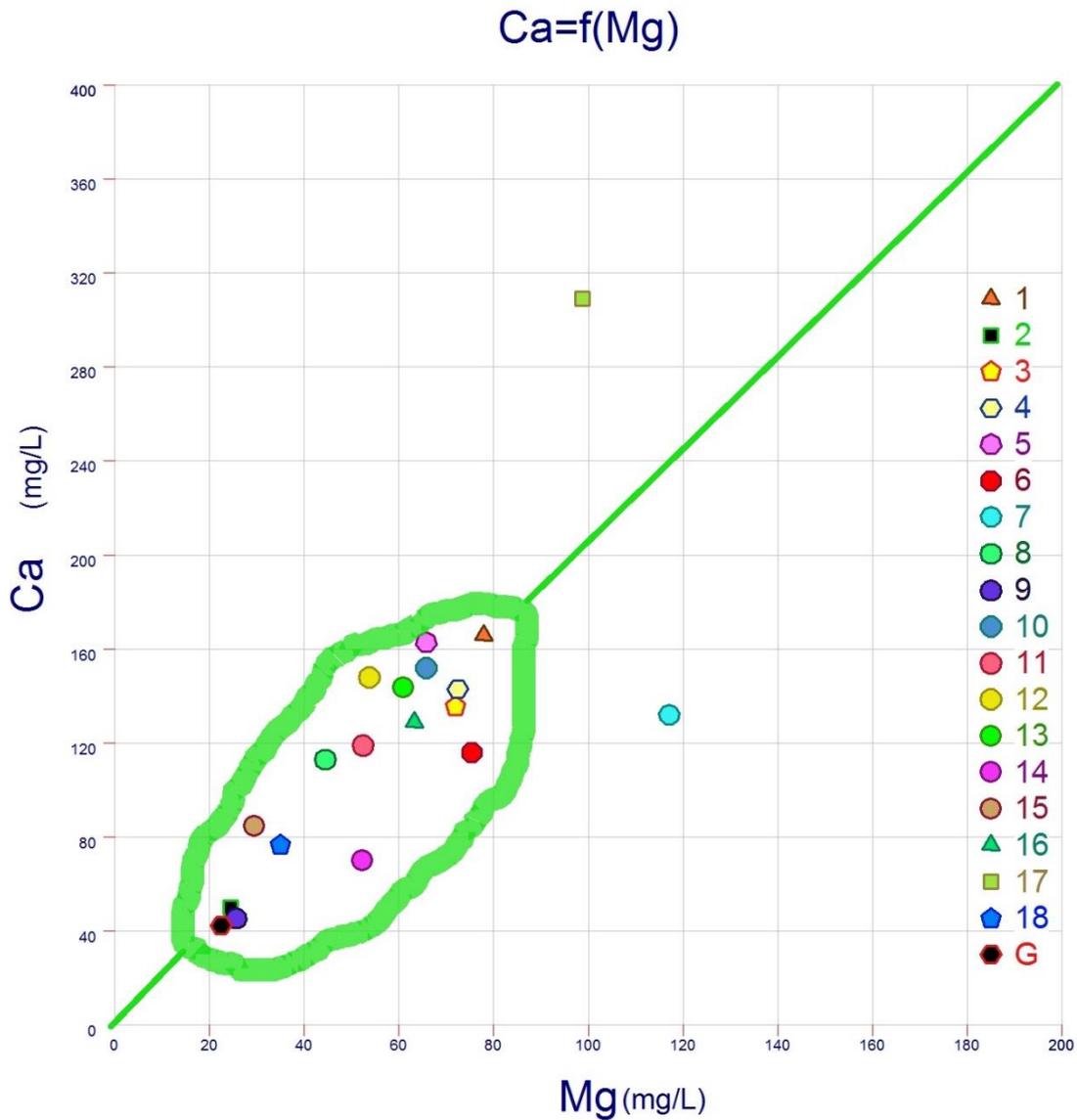


Figure24 : Graphique obtenue par le logiciel Diagramme montre la teneur du Calcium dans les échantillons en fonction du Magnésium.

La droite verte qui sépare le graphique en diagonale, est d'équation : $y=2x$ c'est-à-dire $Ca=2 * Mg$.

Tous les échantillons sont très proches à cette droite à l'exception de deux exemples :

- le 1^{er} très riche en Ca-Mg, mais plus calcique que magnésien ($Ca =$ plus que $3 * Mg$) c'est l'échantillon N°17 (puits Aguerd), il a la valeur maximale en calcium (309mg/l).

- le 2^{ème}, relativement riche en Ca-Mg, c'est le plus équilibré en termes de Ca-Mg (très proche à la droite Ca=Mg), c'est l'échantillon N°7 (puits du village Tinfitt), il a la valeur maximale en Mg (117mg/l).

Les deux échantillons de Win Timdouine en noir (à l'intérieur de la grotte : G, et la source : 2) sont situés sur la droite verte (Ca=2*Mg), comme les échantillons 18, 11 et 1. Ceci explique que le réservoir donnant naissance à ces eaux est calcaro-dolomitique.

d. Faciès chimique des trois sources

Le diagramme triangulaire ci-dessous montre les faciès chimiques des trois sources (Tamlalt, Win Timdouine et Tanguit).

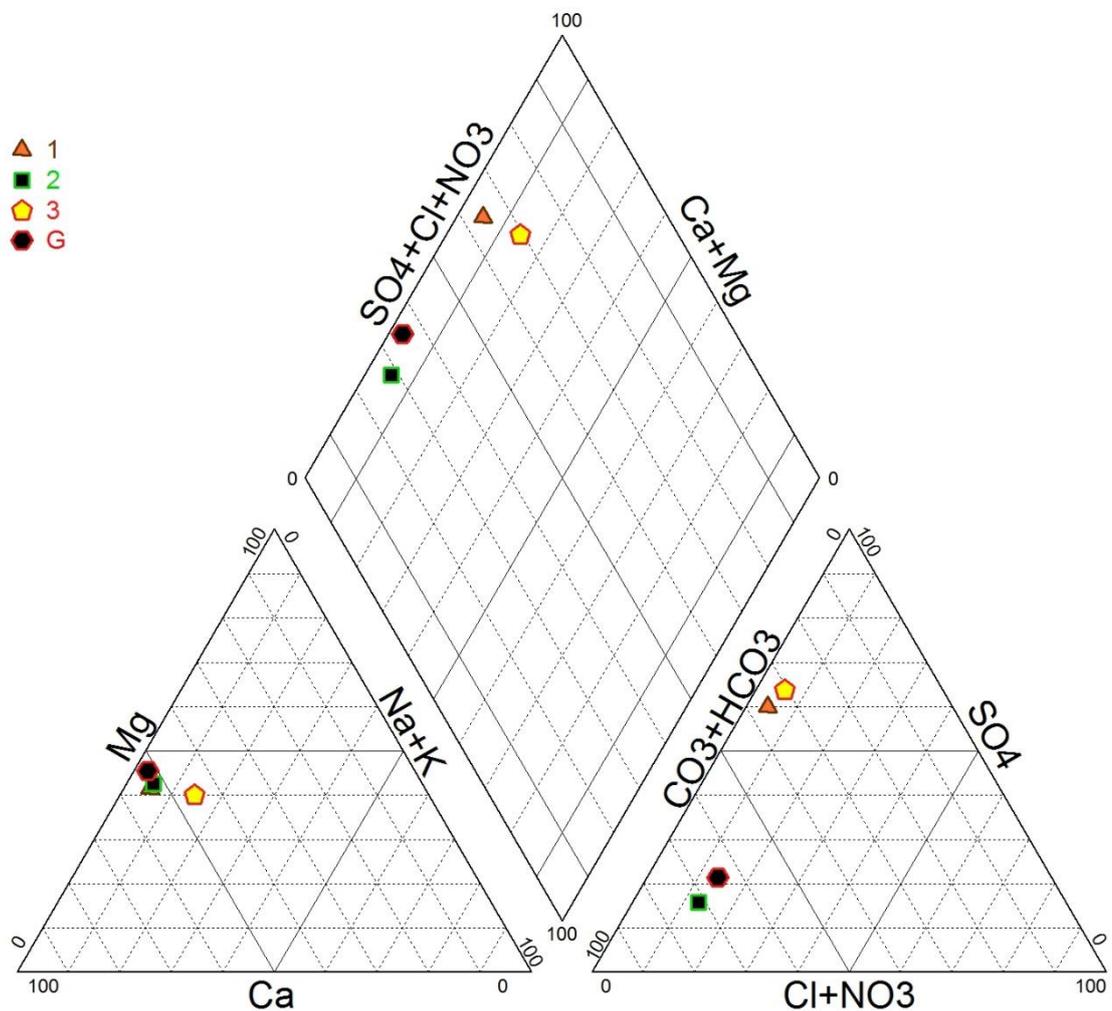


Figure25 : Les faciès chimiques des trois sources du site Win Timdouine

Deux faciès se distinguent :

- ❖ Faciès chloruro-sulfaté calcique-magnésien (FCSCM) ;
- ❖ Faciès Bicarbonaté-calcique et magnésien (FBCM).

Ces deux faciès sont ceux définis pour toute la région étudiée. Or, les deux sources Tamlalt (1) dans le plateau et Tanguit (3) au voisinage de Win Timdouine ont le 1^{er} faciès chimique (FCSCM), par contre l'eau de Win Timdouine de l'intérieur de la grotte (G) comme à l'exutoire (2) a le 2^{ème} faciès (FBCM).

Une petite distinction pour l'eau de Win Timdouine réside dans les teneurs en anions (Sulfates et Bicarbonates), l'échantillon de la source est moins minéralisé en sulfates et plus riche en bicarbonates (environ 10% de différence) par rapport à l'eau du 1^{er} lac (de la grotte). La distinction selon les cations est bien négligée (moins de 5% entre les deux échantillons).

Les deux sources Tamlalt et Tanguit, se différencient en cations (environ 10% de différence) et en anions (moins de 4% de différence). La source Tamlalt (1) est plus riche en Ca-Mg et pauvre en Na-K au contraire avec la source Tanguit (3).

Les échantillons de ces trois sources sont représentatifs effectivement de toute Tazentoute. Ils présentent un comportement similaire, en gros, en termes d'enrichissement et/ou appauvrissement en élément chimiques. Le graphique (figure 26) montre la relation calcium- magnésium. Le faciès et les teneurs en Ca et Mg indiquent la nature carbonaté et dolomitique du réservoir aquifère du plateau de Tasroukht lessivé par les eaux sortant au niveau des sources étudiées.

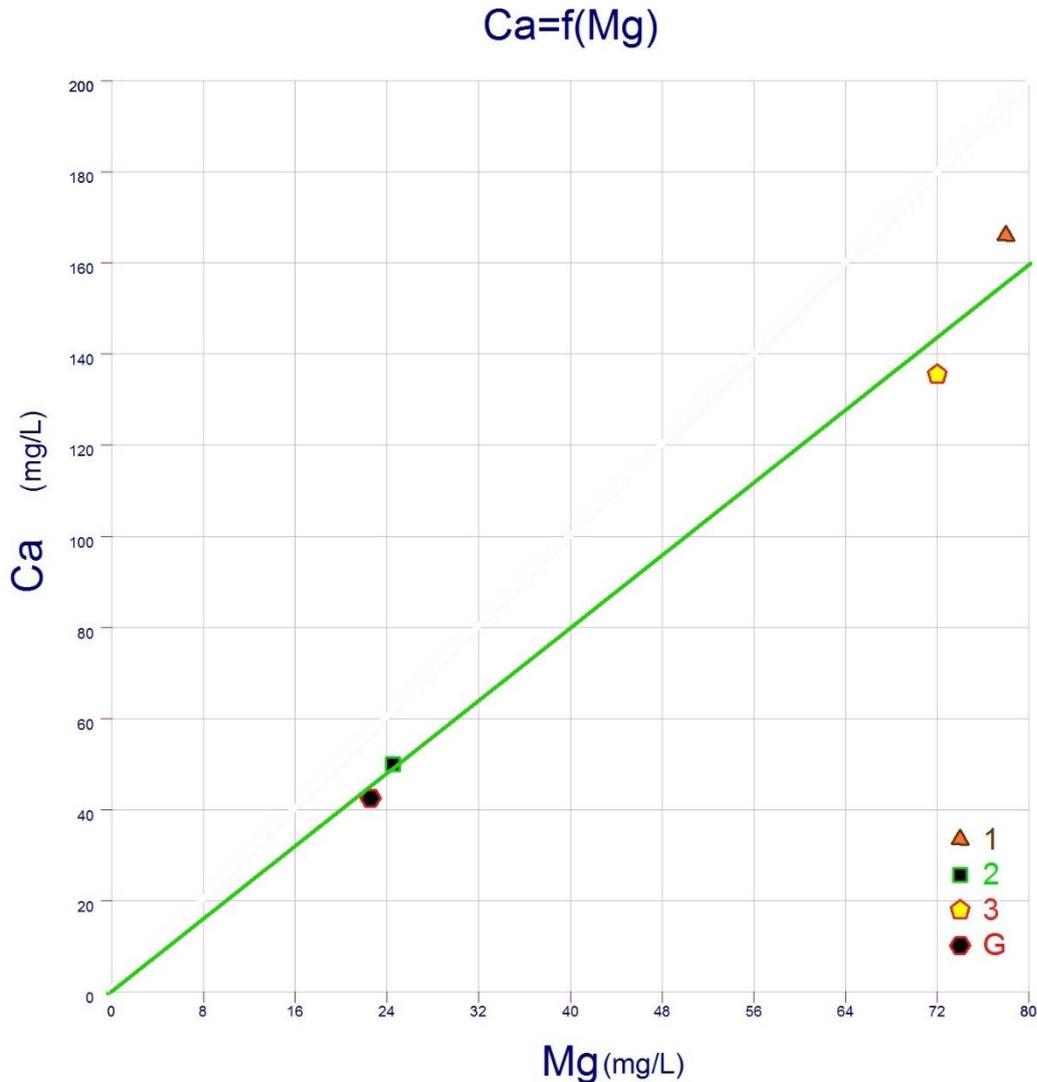


Figure26 : Graphique montre la teneur en calcium en fonction de celle en magnésium, valeurs en (mg/l).

La droite est une droite d'équation : $y=2x$ c'est-à-dire $Ca=2*Mg$.

Les 4 échantillons sont situés sur la droite. L'eau de la grotte est l'échantillon le moins minéralisé en Magnésium, en calcium, en potassium, en sodium, et en bicarbonates. Représente la même teneur qu'à la résurgence en chlorures (14,20mg/l), et relativement plus riche en sulfates et nitrates. Ces remarques donnent un signal sur la relation entre le réseau souterrain Win Timdouine, et les autres sources d'eau vers le SW, bien que cette eau ne représente pas le réseau en entier. En effet, même les eaux superficielles de la région écoulent sensiblement vers le Sud ou vers l'Ouest.

Interprétation minéralogique :

La figure ci-dessous obtenue par le logiciel Diagramme, et à l'aide d'Excel, donne une idée sur la minéralogie des roches traversées par les eaux de Win Timdouine (voir la figure qui suit).

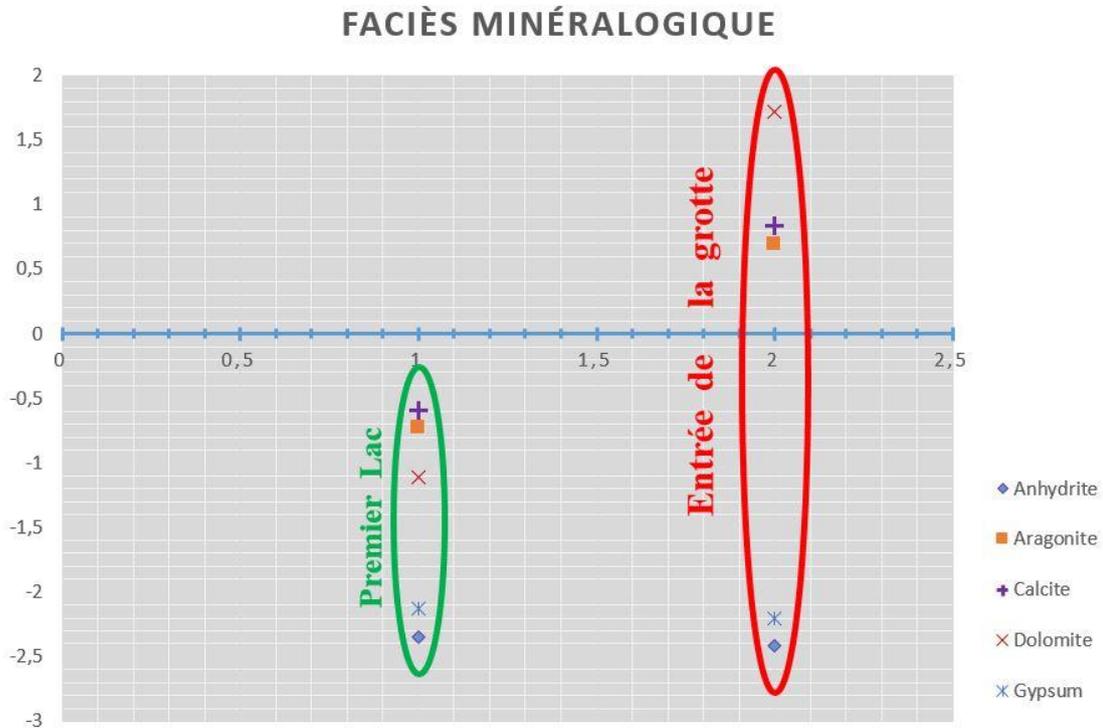


Figure27 : Graphique montre une comparaison entre la minéralisation des roches dissoutes par les eaux de Win Timdouine.

La ligne bleue au milieu sert d'une ligne de saturation. Sur le graphique il y a deux familles des eaux : l'eau collectée tout près du premier lac (en vert) et l'eau de la source de Win Timdouine (en rouge). Le champ en-dessous de cette ligne correspond au champ de sous-saturation en minéraux qui s'y trouvent, par contre, le champ (au-dessus) correspond au domaine de la sursaturation.

Les eaux montrent une sous-saturation en gypse et anhydrite, ce qui indique probablement que le site est donc pauvre en ces minéraux.

Paradoxalement, l'eau de la source de Win Timdouine est saturée par la Dolomite, la Calcite et l'Aragonite. En conclusion, le site représenté par cette eau est très riche en Dolomite, et Calcite. Le Gypse et l'Anhydrite sont négligeables. Ceci est en concordance avec la nature lithologique du massif où les calcaires et dolomies dominent.

L'eau collectée au niveau du premier lac est la même eau au niveau de la source. On peut supposer franchement, que la sursaturation de l'eau de la source par rapport aux trois minéraux (Dolomite, Calcite, et Aragonite) est due à la simple dissolution des formations qu'elle traverse depuis la zone d'infiltration jusqu'au la sortie au niveau de l'exutoire de la grotte. L'importance du réseau karstique et la diversité des formes karstiques témoignent d'une dissolution importante du massif carbonaté de Win Timdouine.

Plus général, l'application de cette interprétation sur les quatre échantillons a donné quelque chose significative. La figure ci-après représente les résultats.

FACIÈS MINÉRALOGIQUE

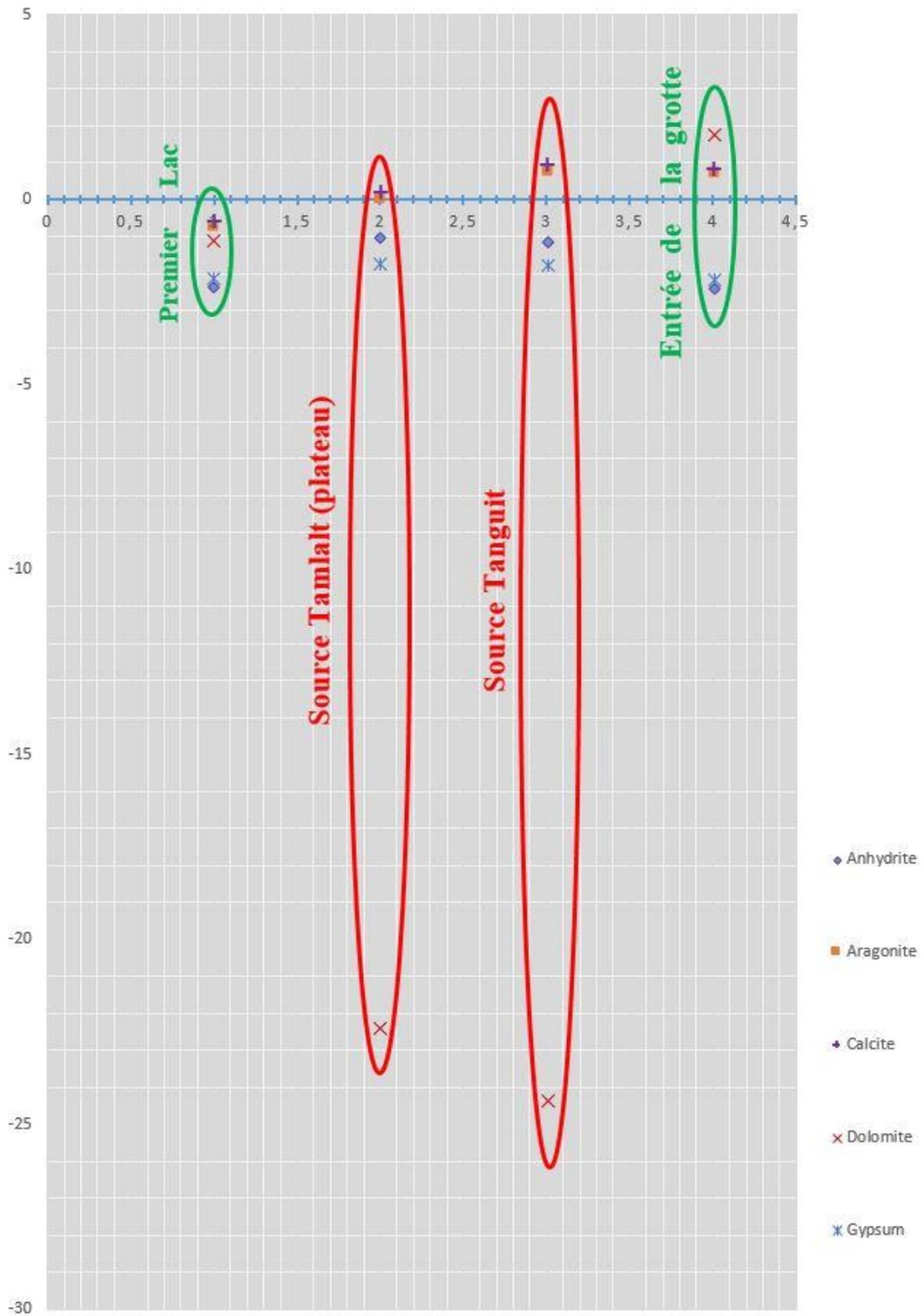


Figure28 : Graphique montre une comparaison entre la minéralisation des roches dissoutes par les quatre échantillons des eaux identifiées.

La source Tanguit a le même comportement minéralogique en termes de Calcite et Aragonite, que la source Win Timdouine. Tandis que la source Tamlalt (plateau) est bien équilibrée de la part de ces minéraux. Les quatre échantillons ont le même comportement introduit par les minéraux d'Anhydrite et de Gypse (sous-saturation), mais les sources Tamlalt et Tanguit sont plus proche à la droite de saturation.

La figure montre que la source Tanguit et Tamlalt sont respectivement 24 et 22 fois sous-saturées en Dolomite que le cas de l'eau de l'intérieur de la grotte Win Timdouine.

La source Tamlalt se trouve dans le plateau de Tasroukht sort des formations géologiques de Kimméridgien qui contiennent moins de dolomite.

La source Tanguit pauvre en Mg, émerge dans la formation géologique N°7 (Figure 8) correspondant au Calcaire dolomitique du callovien supérieur (Bouchaou et Beraaouz, 2011). La figure dit que l'eau de cette source n'a pas traversé autant les dolomites ou bien les conditions n'ont pas été favorables pour la dissolution.

2. L'hydrochimie isotopique :

Les analyses isotopiques (^{18}O et ^2H) ont concerné 9 points d'eau échantillonnés le 13 Mai 2014.

Les résultats de ces analyses sont présentés dans le tableau ci-dessous (tableau7). Ils indiquent la même signature isotopique pour l'ensemble des échantillons étudiés. La moyenne étant de -5.83 ‰ vs. SMOW (Standard Mean Ocean Water) pour ^{18}O et -36.25 ‰ vs. SMOW pour ^2H (Deutérium). La variance est très faible ($V_{18\text{O}}=0.02$ et $V_{2\text{H}}=0.8$) témoigne d'une grande homogénéité (voir tableau ci-dessous).

Tableau8 : Résultats des analyses isotopiques pour les eaux de la grotte Win Timdouine.

Description		d(18_16)Moy	d(D_H)Moy
Wt1	La méduse	-5.67	-35.22
Wt2	2 ^{ème} Lac	-5.58	-34.43
Wt3	3 ^{ème} Lac	-5.85	-36.63
Wt4	4 ^{ème} Lac	-5.91	-36.82
Wt5	Début du 5 ^{ème} lac (Rive droite)	-5.87	-37.00
Wt6	Début du 5 ^{ème} lac (Rive gauche)	-5.90	-36.96
Wt7	entre le 4 ^{ème} et 5 ^{ème} lac	-5.93	-36.75
Wt8	A la sortie de Win Timdouine (~7m)	-5.82	-35.91
Wt11	A côté de l'échantillonneur	-5.94	-36.57
Moyenne		-5.83	-36.25
Variance		0.02	0.80

La projection des teneurs isotopiques sur le diagramme ^{18}O - ^2H montre que les points d'eau étudiés sont globalement alignés selon la droite météorique mondiale (Global Meteoric Water Line : GMWL de l'équation $^2\text{H}=8*^{18}\text{O}+10$).

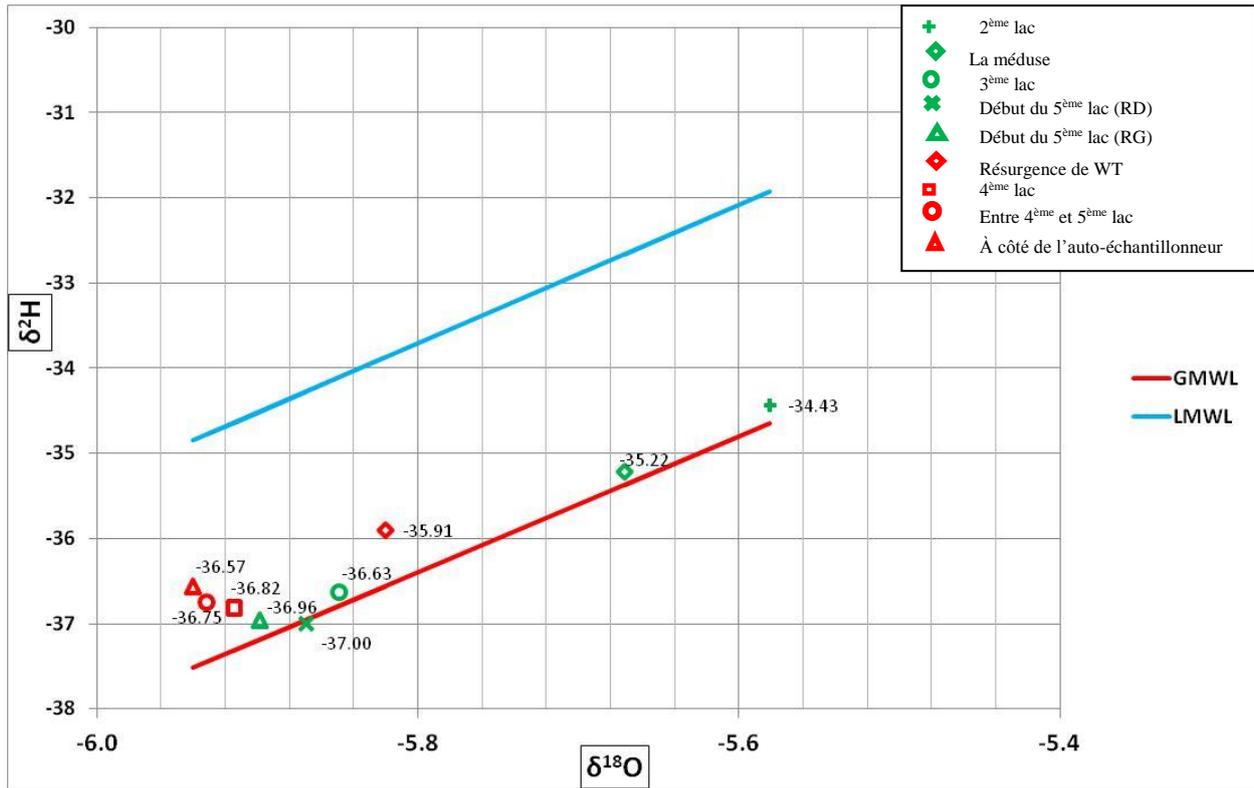


Figure29 : Variation des teneurs en ^{18}O en fonction du ^2H dans les eaux de la grotte Win Timdouine.

Elles se situent sur ou très proche de la droite de référence des précipitations mondiales (GMWL). Les points ne représentent pas beaucoup de différence. Le graphique ci-dessus montre les teneurs isotopiques d'un site très localisé (la grotte Win Timdouine) il prit en compte tous les détails, et variations locales (distance entre échantillons de quelques mètres).

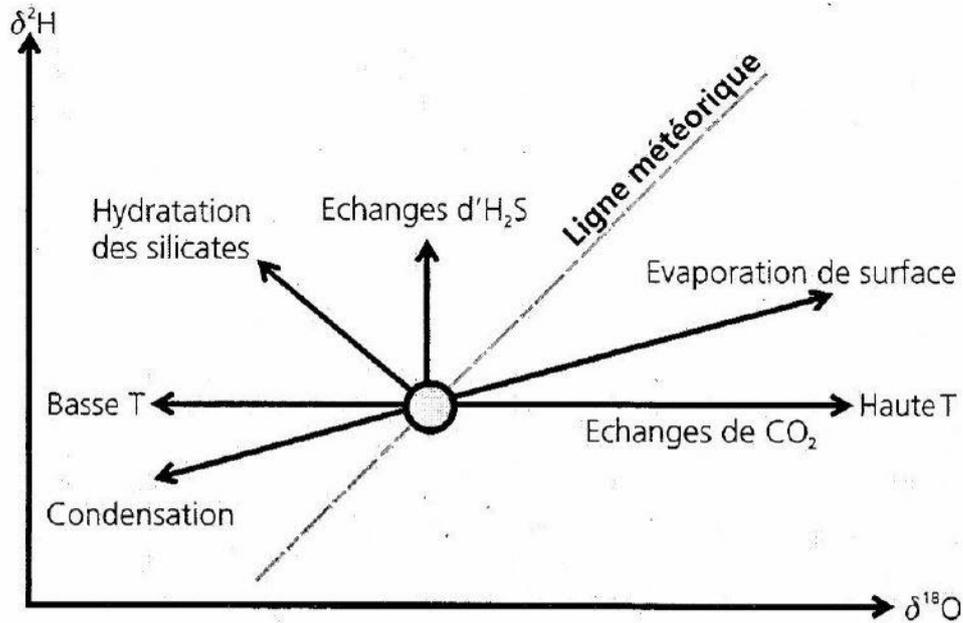


Figure30 : Processus naturels pouvant influencer les compositions en Deutérium et en Oxygène-18 des eaux souterraines (d'après Clark et Fritz, 1997).

Par ailleurs, l'homogénéité isotopique et les faibles concentrations en éléments chimiques ($CE=401\mu\text{s/cm}$), témoignent que les eaux de la grotte de WT ont gardé leur empreinte météorique puisque leurs minéralisations ne sont pas trop affectées par les processus physico-chimiques, tels que : l'évaporation, la précipitation, l'échange avec la roche...

C. CONCLUSIONS, DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

La rivière souterraine Win Timdouine, a une importance scientifique pour les géographes, les géologues, les hydrogéologues et les biologistes. Elle représente également un réservoir énorme en eau souterraine de meilleure qualité chimique d'environ deux millions m³/an, pour les habitats de la région (Tazentoute, Assaka...). Le site Win Timdouine est un centre touristique et milieu convenable très intéressant de loisirs, et découverts, aussi bien à l'échelle nationale qu'internationale.

Nous recommandons d'avance de la bien protéger contre les agents polluants, et d'aménager son environnement (route, parking, lieu de repos, lieu de loisirs pour les enfants...), ainsi de renforcer la sécurité des visiteurs, et en premier lieu, l'aménagement de la falaise qui représente un danger réel par ses blocs détachés surtout au voisinage de la grotte.

Le plateau de Tasroukht (altitude moyenne Z=1500m) est un « bassin hydrogéologique » d'environ 16km² drainé essentiellement par la rivière souterraine Win Timdouine, il a comme exutoire la résurgence de Win Timdouine (Z=1400m). Ce plateau occupe une place primordiale dans l'alimentation des sources voisines en eau, issue essentiellement des précipitations hivernales (pluies et neiges) qui tombent sur la région d'une manière hétérogène durant l'année (le mois Décembre, Novembre, puis Février, Mars, et Janvier...), d'une moyenne alentour de 400mm/an.

Les oueds de la région coulent généralement vers le Sud (l'Oued Issen et l'Oued Souss), ou vers l'Ouest (l'Oued Tamri et l'Oued Tamghart). Les trois premiers quarts du réseau souterrain Win Timdouine coulent sensiblement vers le Nord-Ouest à l'Ouest, tandis que le dernier quart (à partir du « Balcon », jusqu'à la source) coule vers le Sud-Ouest.

Les analyses physico-chimiques des eaux ont permis de déterminer leurs minéralisations :

- Quatre échantillons ont une qualité chimique **moyenne** (CE entre 1300 et 2700µs/cm) qui sont les eaux des sources de Tamlalt, Tanguit, du puits du village Tinfet et du puits du village Aguerd.
- 14 échantillons ont une qualité chimique **bonne** (CE entre 400 et 1300µs/cm), qui représentent la majorité des échantillons.

- Parmi ces 14 échantillons, on note deux échantillons les plus significatifs par leurs bonnes qualités : la source² au Sud de Tazentoute (sur la route) qui est apparue par le creusement des engins lors de la réparation de la route qui mène à Imouzzer par Tazentoute, tout près du petit pont, (N°9, CE=475µs/cm). Le deuxième échantillon c'est celui de la source Win Timdouine (N°2, CE=401µs/cm). L'eau de Win Timdouine, représente la **meilleure** qualité sur toute la série en termes de minéralisation.

Selon leurs pH, la moyenne est 7,68. La valeur la plus élevée est celle de WT et Tirhanimine (8,34).

Selon leurs caractérisations chimiques, les eaux de Tazentoute, Assaka, Tanit et Aguerd sont d'excellente à bonne qualité chimique.

Elles sont enrichies en bicarbonates (37%), suivi par les sulfates (36%), le calcium (15%), le magnésium (7%), les chlorures et le sodium, chacun (2%), et les nitrates et le potassium ensemble (1%). Leurs teneurs en sodium et potassium sont conformes aux normes OMS 2011, comme celles du Maroc pour la potabilité. La teneur en bicarbonate est trop élevée surtout pour le puits du village Asofid (526,06mg/l).

La question des sulfates est la plus sensible, car les normes d'OMS 2011 déterminent la valeur des sulfates acceptée pour une eau potable dans moins de 250mg/l. Or la moyenne de sulfate est 293,06mg/l, dont quatre échantillons y sont trop chargés (Tamraght, la source de Tanguit, le puits de Tizgui N Chorfa). L'eau de la source Tamlalt dans le plateau, est à son tour, anormalement chargée en sulfates (498,56mg/l), elle dépasse même les normes marocaines qui fixent la teneur en sulfate pour l'eau potable en 400mg/l.

Le cas exceptionnel est celui du puits Aguerd qui est dangereusement chargé en sulfates (918,56mg/l) plus de trois fois la limite acceptée pour l'eau potable, il est trop chargé aussi en calcium (309mg/l).

Ces anomalies en sulfates peuvent être expliquées par la dissolution des niveaux gypseux rencontrés dans les formations jurassiques qui affleurent à quelques kilomètres des sources et puits chargés en sulfates.

La grotte Win Timdouine est riche en spéléothèmes (stalactites, stalagmites, fistuleuses, colonnes...). Son réseau souterrain (19km) est formé de couloirs et de salles de taille variable (15m³ à 70m³). Ces vides sont issus de la dissolution de la roche carbonatée par les eaux relativement acide. Cela se traduit par un enfouissement du réseau hydrographique à l'intérieur des cavités naturelles.

La dissolution suit en général la direction de la faille décrochante visible depuis l'entrée de la grotte. Les bifurcations (embranchements) du réseau suivent les failles conjuguées ou les interbanes et fractures principales. Le pendage des couches (dénivelé entre la zone d'absorption de l'eau et le niveau de base) a vraisemblablement favorisé et accéléré les processus de formation du réseau souterrain.

Les spéléothème, les stalactites en particulier, ont une croissance annuelle parfois bien enregistrée dans la superposition des couches qui les constituent leurs études fournies des renseignements sur les paléoclimats (température, pluviosité...) et les paléoenvironnements.

Dans le cadre de la reconstitution de l'évolution paléoclimatique de la région de WT durant l'Holocène, une équipe de recherche est en cours de faire l'analyse isotopique sur les échantillons de stalagmites des grottes de la région d'Ida Ou Tanane (dont fait partie la grotte WT). Les analyses portent sur $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ des lamines de croissance. Ces dernières sont datées par la méthode Uranium-Thorium ($^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$).

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- Ambroggi R. (1954) : Cadre géologique de la rivière souterraine de Wit Tamdoun dans les Ida Ou Tananes. Rapport du centre des études hydrogéologiques du Maroc. Rabat, 8 p.
- Ambroggi R. (1963) : Etude géologique du versant méridionale du Haut Atlas Occidental et de la Plaine du Souss. *Notes et mem. Géol. Maroc*, N° 157, 322p.
- Angelova D., (2002) : Paleoseismic Deformations in Karst Terrains in Bulgaria and Morocco. Proc. Jubilee Int. Congr. In Memoriam to Prof. D. Yaranov, Varna, 2, 76-85.
- Angelova D., Belfoul M.A., Bouzid S., et Faik F., (2005) : karst and cave systems in Bosnek region (Vitoshka mountain, Bulgaria) and Win Timdouine (high atlas mountain, Morocco).
- Association Sportive de Spéléologie, (1997) : expédition internationale de spéléologie « spécial Win Timdouine 97 ». *Province Chtouka Ait Baha, Agadir. Maroc*. Rapport de l'expédition 46 Pages.
- Bakalowicz M., (1979) : Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse Doctorat ès Sciences naturelles, Univ. P. Et M. Curie, Paris 6, Géologie dynamique et Laboratoire Souterrain CNRS, Moulis, 269 p.
- Bakalowicz M., (1999) : Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Agence de l'Eau, Bassin Rhone-Mediterranee-Corse. *Guide technique n° 3*. Lyon Cédex 07. 40 p.
- Bakalowicz M., (2002) : Hydrogéologie karstique Caractéristiques et concepts. Méthodes d'exploration, d'exploitation et de gestion active. Hydrosciences Montpellier, Cours DEA H.H.G.G. Université Paris-6.
- Bichain J-M, (2007) : Bilan du dernier trimestre 2007 sur la préparation de l'expédition Win-Timdouine 2008, rapport.
- Boinet N. (1999) : Exploitation de la fracturation d'un massif par la karstification : exemple du Causse de l'Hortus (Hérault, France). *Bergerie de l'Hortus*, 34270 Valflaunes, France. *GeodinamicaActa* (Paris) 1999, 12, 3-4, 237-247.
- Bouchaou L., Qurtobi M., Hsissou Y., Boutaleb S. (2002) : The Underground River of Win Timdouine (Agadir Region, High Atlas) : a Contribution to the Inventory of the Geological Heritage in Morocco. *Karst and Environment*. P. 273-279.
- Bouchaou L. Et Beraaouz, E. (2011) : La grotte Win Timdouine (Haut Atlas occidental, agadir-ida-outananes, Maroc) Synthèse des études scientifiques et des explorations spéléologiques. Rapport pour la région Souss-Massa-Draa.
- Brown R. H. (1980) : Triassic rocks of Argana valley, southern Morocco, and their regional structural implications. *AAPG Bull.*, 64, 988-1003.
- Devos A., Jaillot S., et Gamez P., (1999) : Structure tectoniques et contraintes de cheminement des eaux dans les aquifères karstiques du barrois (Lorraine/Champagne, France). UFR de lettres et sciences humaines, Ile de Sauley, 57045 Metz cedex, France. *Geodinamica Acta* (Paris) 1999, 12, 3-4, 249-257.
- Fiechtner L. Et al. (1992) : Geochemistry and geochronology of early Mesozoic tholeiites from Central Morocco. *Géol. Rundsch.*, 81/1, 45-62.

- Fizaine J-P, et Gamez P. (2007) : Le karst de la rivière souterraine de Wit Tamdoun à Tazentout (Haut-Atlas atlantique, Maroc), résumé dans le *Colloque du 6 juin, Hommage à André Weisrock*, AFEC – FLAG – GFG, Centre d'Études et de Recherche sur les Paysages, *Dép. De Géographie, Univ. Nancy 2*.
- Häuselmann P. (1999) : Relationships between karst and tectonics: case-study of the cave system north of Lake Thun (Bern, Switzerland). Geological Institute, University of Berne, Baltzerstr. 1, CH-3012 Bern, Switzerland. *Geodinamica Acta* 12 (1999) 377–388.
- International Commission on Stratigraphy, (2013) : INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART, Chart drafted by Cohen K.M., Finney S., Gibbard P.L. le sit web de la commission est : www.stratigraphy.org;
- Medina F., El Amrani I. E., et Ahmamou M., (1992) : les laves fini-triassique de la région d'Argana : précision sur leur gisement et leur pétrologie. *Bull. Inst. Sci., Rabat, Maroc*, N°16 pp. 23-30.
- Medina F., Vachard D., colin J-P, Ouarhache D. & Ahmamou M., (2001) : Charophytes et ostracodes du niveau carbonaté de Taourirt Imzilen (Membre d'Aglegal, Trias d'Argana) ; implications stratigraphiques. *Bulletin de l'Institut scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre, 2001, n°23, 21-26.
- Monbaron M., (sans date) : Géomorphologie générale, 10-Structures et roches : le processus karstique. pp. 97-112.
- Najid M ; (1986) : Etude hydrogéologique du plateau de Tasroukht et de la source de Win Timdouine (Haut Atals Occidental, Maroc). Mém. CEA, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 46 pages.
- Négrel Ph., E. Petelet-Giraud, A. Brenot, R. Millotet Ch. Innocent, 2008. Caractérisation isotopique et géochimique des masses d'eau dans le bassin Adour-Garonne : interconnexions et hétérogénéités – CARISMEAU. Rapport final. Tome 1 : Les outils isotopiques appliqués à la gestion des ressources en eau. Exemple de la masse d'eau des sables Infra-molassiques. Rapport BRGM/RP-56291-FR, 192 p., 45 ill.
- Quinif Y. (1999) : Karst et évolution des rivières : le cas de l'Ardenne. Cerak, faculté polytechnique de Mons, rue de Houdain, 9, B-7000 Mons, Belgique. *Geodinamica Acta* (Paris) 1999, 12, 3-4, 267-277.
- Qurtobi M., Bouchaou L., Chauve P., Mudry J., et Boutaleb S., : Reconnaissance hydrogéologique et spéléologique de la rivière souterraine de Win Timdouine, plateau de Tasroukht. Haut Atlas Occidental Maroc.
- Qurtobi M., (1996) : Reconnaissance hydrogéologique de la région d'Imouzzer des Ida Outananes. Méthodologie d'étude en zone montagneuse semi-aride et non équipée. Haut Atlas occidental, Maroc. Thèse. 154 p.
- Rodet J. (1999) : Le réseau de fracturation, facteur initial de la karstification des craies dans les collines du Perche : l'exemple du site de la Mansonnière (Bellou-sur-Huisne, Orne, France). Laboratoire de géologie, UFR des sciences, univ. De Rouen, 76821 Mont-Saint-Aignan cedex, France. *Geodinamica Acta* (Paris) 1999, 12, 3-4, 259-265.
- Sebai A. Et al. (1991) : $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and geochemistry of tholeiitic magmatism related to the early opening of the Central Atlantic rift. *Earth and Planet. Sci. Letters*, 104, 455-472.
- Société Suisse de Spéléologie (SSS), (sans date) : rapport publicitaire intitulé : Cavernes-monde fragile. Commission de protection des cavernes.

- Tuong V., (2003) : Guide pratique pour la rédaction d'un mémoire de fin d'études. Inh, Ph.D. Professeur d'informatique Directeur des études. *Institut de la Francophonie pour l'Informatique*.
- Trillo Ferdiaico Ramirez & Angel Munro Marin, (1981) : Topo de la rivière Win Timdouine. G.E.S de la S.E. de Malaga
- Trillo, F.R. & Marin, M.M. (2002) : Topographie de la rivière souterraine de Win-Timdouine. G.E.S. SE de Malaga.
- Le petit guide à l'usage du rédacteur d'un mémoire ou d'un rapport de stage (1999), Université Charles de Gaulle, Lille III, UFR de Mathématiques, *Sciences Economiques et Sociales*.
- Guide de rédaction d'un mémoire de maîtrise (2000), Université de Tunis, *Institut Supérieur de Gestion*.
- La rédaction d'un mémoire, Guide pratique pour l'étudiant. (Mai 2004).
- Carte topographique d'Imouzzer des Ida Ou Tanane à l'échelle 1/50.000 publié en 1966, et l'autre à l'échelle 1/100.000.
- Carte Géologique du Maroc publié en 1985, sur l'échelle 1/1 000 000.
- Données météorologiques, de Barrage Abdelmoumen entre 1984 et 2012, et de la station d'Imouzzer entre 1932 et 2009, service hydraulique.
- Photographie du terrain en mois Mars 2014, par EZINI E.A. et son équipe.

REFERENCES WEBOGRAPHIQUES

- Site officielle de la grotte Win Timdouine :
<http://wittamdoun.free.fr/>
- International Commission on Stratigraphy :
<http://www.stratigraphy.org/>
- la Société Suisse de Spéléologie :
<http://www.speleo.ch/~site/>
- Le club Alpin Français :
<http://www.ffcam.fr/>
- L'association de Spéléologie d'Agadir :
<http://asa-spelio.org/>
- Fédération spéléologique européenne :
<http://fsue.ffspeleo.fr/>
- L'encyclopédie Wikipédia :
http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal
- le journal Aujourd'hui (le : 15-04-2011) :
www.aujourd'hui.ma

LES ANNEXES

HISTORIQUE ET DESCRIPTION SPELEOLOGIQUE DE WIN TIMDOUINE

1. Historique de Win Timdouine

Avant le **1er février 1948**, les explorations de la grotte Win Timdouine ont été réalisées uniquement par les autochtones.

C'est par la création de la Société Spéléologique du Maroc (**SSM**), que les explorateurs nationaux et internationaux vont ouvrir les yeux sur la grotte Win Timdouine peu à peu.

A partir de **1950**, les spéléologues de la SSM ont exploré environ 1000 mètres à partir de l'entrée de la grotte.

En **1953**, les explorations de la SSM ont réussi à découvrir 3000 mètres de l'entrée.

En **1954**, les équipes françaises de spéléologie sont ajoutés à la liste des explorateurs de Win Timdouine, c'était l'année où Ambrojji a été levé une coupe lithostratigraphique du site Win Timdouine.

En **1957**, les explorations se poursuivaient pour aboutir à 6105m de l'entrée.

Dans le **période de 1966 à 1986**, plusieurs études ont été effectuées sur le site Win Timdouine : biospéléologique (Rass-Spelital 1966, Escola Oleguer 1971, Chauve 1971) ; Hydrogéologiques (Majid 1986, Perez 1982) ; études sur le plateau de Tasroukht (Dura et Wolf 1982, Marchand 1983)...

En **1981/1982**, deux expéditions espagnoles, se sont essentiellement consacrées au levé topographique précis de la cavité.

En **1986**, création de l'Association de Spéléologie d'Agadir (**ASA**).

En Février **1988**, blocage de 9 spéléologues amateurs (6 marocains et 3 étrangers), à l'intérieur de la grotte à cause de la haute eau (plus des détails dans la page : 12).

En **1996**, création de l'Association Sportive et de Spéléologie d'Agadir (**ASS**), et l'étude hydrogéologique de la région, par Qurtobi...

En **1997**, pour la première fois au Maroc : l'expédition internationale de spéléologie « SPECIAL WIN TIMDOUINE 97 », du 19 au 27 Juillet 1997, une telle expédition de ce poids, avec la participation de l'ASS, l'ASA, une association du Marrakech (**CMM**), et plusieurs scientifiques chercheurs, spéléologues et autres spécialistes de : Canada, Liban, Irland, et France. Parmi ses profits c'étaient la découverte jusqu'à 5095m de l'entrée de la

grotte en plus d'un inventaire faunistique... cette expédition est organisée par la région Souss Massa Draa et la Wilaya d'Agadir.

Expédition **2007** par ASS et CAF : c'était en avril 2007 par des chercheurs de la faculté des sciences, en tant qu'une expédition préparatrice pour l'« Expédition Internationale 2008 ».

En **2008**, rencontre à la faculté des sciences d'Agadir au congrès international sur la spéléologie scientifique et touristique intitulé : « Le monde souterrain : patrimoine et vecteur de développement humain durable » du 23 au 26 avril.

De **10 Juillet à 10 Aout 2008**, l'expédition scientifique et spéléologique franco-marocaine : ses résultats sont encore de publication dans les revues internationales, quelques données préliminaires sont disponibles sur le site web de la grotte (<http://wittamdoun.free.fr>).

En **2010**, échantillonnage des spéléo-thèmes (concrétions) : Un groupe de chercheurs internationaux de l'institut de recherche pour le développement (IRD), l'université de Rio de Janeiro (Brésil) en collaboration avec les chercheurs de la Faculté des Sciences d'Agadir (Laboratoire de Géologie Appliquée et Géo-Environnement « LAGAGE ») et les spéléologues de l'ASS ont effectué un échantillonnage dans la grotte de Win Timdouine dans le but d'étudier les paléoclimats. Les échantillons sont en cours de datation et les résultats seront publiés prochainement.

En Mars 2014, visite spéléologique de notre équipe scientifique, avec la participation du laboratoire LAGAGE, et des étudiants de l'Université Bonn de l'Allemand, et des membres de l'ASS. L'objectif était l'installation d'un auto-échantillonneur, pour une collecte périodique, de l'eau de l'intérieur à la grotte.

2. Description Spéléologique de la Grotte

La spéléologie est l'activité qui consiste à repérer, explorer, étudier, et cartographier les cavités souterraines. La spéléologie est donc une activité à multiples facettes : scientifique, sportive, technique, contemplative... Le spéléologue c'est celui qui pratique la spéléologie.

Les **100** premiers mètres de la cavité Win Timdouine comportant un petit canal de captage des eaux creusé par les autochtones, et mènent à un premier plan d'eau nécessitant une navigation. On passe sous une colonie de chauve-souris.

Plus loin, on aboutit au bas d'une cascade stalagmitique non active (corde en place), balayé par un fort courant d'air. Cette cascade peut se court-circuiter par une diaclase sèche à sa droite, ou par un petit affluent actif, à sa gauche (rive droite), présentant plus loin une voûte mouillante ; les trois passages débouchent dans le même bassin supérieur. La navigation se poursuit dans des bassins de plus en plus petits, souvent entrecoupés de portages, où il faut abandonner les embarcations.

Peu après, un éboulis de 250m fait suite et l'on retrouve la rivière dans laquelle l'on progresse désormais à pied. Il faut franchir une première zone de carrefours (**le Balcon**) en se guidant aux courants d'air et d'eau (aller vers l'amont). Après une galerie de progression rapide, on passe à côté d'un premier puits remontant (**la Plaza de Toros** « la place du taureau ») dont on aperçoit mal le sommet (40m au minimum).

Il faut ensuite traverser une deuxième zone de carrefours. On continue toujours vers l'amont, on passe « **la galerie des gours** » pour aboutir dans une galerie fossile très boueuse, coupée de plusieurs diaclases transversales. On rejoint la galerie active, et une progression rapide dans « **le Métro** » nous amène au « Grand Aven » ou « **Grande Salle** » située à **5095m** de l'entrée (voir le schéma cartographique de la grotte figure 17, page : 38), et constitué de trois puits remontants adjacents. Peu après, la rivière se sépare en deux affluents d'égale importance :

- La branche droite de la galerie s'arrête à **6300m** de l'entrée à la base d'un puits remontant (**la Puerta d'Escalada**) dans une zone chaotique et marneuse ;
- La branche gauche s'arrête à **7297m** de l'entrée, au point dit « **la Puerta d'Alcala** » colmatée par de grands éboulis où sont gravés des noms et des dates des explorateurs (Association Sportive de Spéléologie d'Agadir, 1997).

MATERIELS ET METHODES UTILISES LORS DE LA PREPARATION DE CE MEMOIRE

Sans négliger de signaler le déplacement sur plus de 700km (de Fès à Agadir), pour bénéficier d'une place dans le laboratoire de Géologie Appliqué et Géo-Environnement (LAGAGE) de la Faculté des sciences d'Agadir (le 28 Janvier 2014) qui est dirigé par le professeur L. BOUCHAOU. Le mois Mars a été consacré aux sorties sur le terrain, avec quatre étudiants de l'Université Allemande Bonn. Les deux premières sorties ont été encadrées par les professeurs BOUCHAOU et BERAAOUZ.

1. Synthèse bibliographique

La grotte Win Timdouine à Tazentoute qui fait partie de la région d'Imouzzer des Ida Ou Tanane, est l'une des formations karstiques les plus étudiées au Maroc et les plus importantes. Durant l'histoire de ses explorations, elle a connu plusieurs études scientifiques :

- Avant de développer les principales études qui ont été concernées la région, il est préférable de signaler d'abord que les cartes géologiques au 1/100.000 ou au 1/50.000 n'existent pas jusqu'à aujourd'hui.
- En 1954 un rapport du centre des études hydrogéologiques du Maroc à Rabat : Cadre géologique de la rivière souterraine de Wit Tamdoun dans les Ida ou – Tananes, réalisé par Ambroggi R.
- En 1963, Ambroggi, R. a présenté sa thèse sur « l'étude géologique du versant méridionale du Haut Atlas Occidental (Imouzzer des Ida Ou Tanane) et de la Plaine du Souss ». Lors de son étude, Ambroggi a fait plusieurs coupes stratigraphiques dans la région, dans sa thèse on trouve : une coupe du Lias inférieur de Tazentoute (page 45), et un croquis de situation des coupes du Lias supérieur du Tazentoute (page 56) : 1. Coupe de Zaouia Tizgui n'Chorfa (le contrebas de la Grotte Win Timdouine), et 2. Coupe d'Imaizen (page 57). Une coupe du Dogger de Zaouia Tizgui n'Chorfa (page 67), coupe de Kimméridgien de Tanit au SW de Win Timdouine (page 118)...

Evolution des faciès du Lias supérieur en Ida Ou Tanane, et plusieurs autres schémas (page 61-64), coupes tectoniques générales de la zone

méridionale du Haut Atlas Occidental (Ida Ou Tanane) et de la vallée du Sous (pages 164-165), une coupe structurale du Haut Atlas Occidental depuis l'Oued Tensift jusqu'à l'Anti Atlas (page 262)...

- Etudes pétrographiques et géochimiques par Brown R.H. 1980, Sebai A. Et al. 1991, Medina et al. 1992, et Fiechtner L. Et al. 1992...
- Les études hydrogéologiques réalisées dans la région d'Imouzzer des Ida Outananes en général et particulièrement dans le site Win Timdouine sont celles de Najid 1986, Qortobi 1996, et Bouchaou et al. 2002.
- Utilisation des cartes topographiques : Carte topographique d'Imouzzer des Ida Ou Tanane à l'échelle 1/50.000 publié en 1966, et l'autre à l'échelle 1/100.000... Carte Géologique du Maroc publié en 1985, sur l'échelle 1/1.000.000.

2. Travaux de terrain et Travaux au laboratoire

En Février, le premier mois du stage, le temps a été consacré surtout aux travaux d'initiation dans le laboratoire, en maîtrisant les manipulations physico-chimiques des éléments majeurs de l'eau, l'utilisation des appareils, et modes opératoires au laboratoire LAGAGE : Spectrophotomètre à U-V, Spectrophotomètre à flamme, dosage volumétrique par l'acide sulfurique, par l'E.D.T.A et par le Nitrate Mercurique, verrerie du laboratoire, distillateurs, étuves etc.



Image25&26 : au sein du laboratoire LAGAGE.

a. La Géologie

Notre groupe de travail a consacré un temps suffisant pour lever la coupe stratigraphique, en commençant par la formation carbonatée de la grotte Win Timdouine (dans la coupe : couche N°5), et en descendant jusqu'à la vallée de Tamraght (770m d'altitude) au voisinage du village Tizgui N'Chorafa (la base de la formation N°10, la formation 11, et le sommet de 12). Sans oublier les mesures structurales comme l'orientation et le pendage des fractures de la formation calcaire N°5, puis 7, 9 et 11 suivant une alternance nettement distinguée : **roche carbonatée** (tendre et fracturé : calcaire, ou dolomie) suivi de **roches marneuse ou argileuse** (fragile).



Image27 : Observation d'un faciès géologique.

La coupe a été complétée en allant de la grotte vers Taourirt My Ali en passant par le plateau.

La première sortie de terrain a été effectuée le 06 Mars 2014, et la dernière le 30 Mars 2014, soit environ 18 jours de terrain si en éliminant les jours libres (les pauses, et ruptures forcées).

b. L'Hydrochimie

Une vingtaine d'analyses physico-chimiques ont été effectuées (sources de l'eau, puits, forages, ou Oueds) en parallèle avec l'étude géologique, mais aussi à partir de Tazentoute vers le SW.



Image28 : Mesures hydrochimiques de terrain, puits et bassin de l'Association du village Asofid à Tazentoute.

Les vingt (20) points échantillonnés sont les suivants, depuis le plateau jusqu'au village Aguerd au SW de Win Timdouine (voir la carte suivante, figure 31) :

- 1. Source Tamlalt (village dans le plateau) ;**
- G. La grotte WT (à la droite du 1er lac) ;**
- 2. Source de Win Timdouine (aménagé) ;**
- 3. Source de Tanguit (non aménagé, et tari en période de sécheresse) ;**
4. Puits du village Tizgui n'Chorafa ;
5. Vallée de Tamraght ;
6. Puits1 de Tazentoute (Association ASOFID) ;
7. Puits2 de Tazentoute (village de Tinfrit) ;
8. Source de Tazentoute (aménagé) ;
9. Source2 au Sud de Tazentoute sur la route ;
10. Forage d'Assaka/ commune Idmine ;
11. Puits1 d'Assaka à la rive contraire de l'Oued (Bahaj) ;
12. Puits2 d'Assaka avec bassin d'objective agricole ;
13. Puits3 d'Assaka dans l'Oued (Talat Mellouene) ;
14. Source de Zaouia Sidi Brahim Ou Ali (Tirhanimine) ;
15. Source1 de Tanit : Source Oumozk (les bicarbonates n'ont pas été faites, c'est pourquoi on est ignorés ses données incomplets) ;
16. Source2 de Tanit : Source Oumlalal ;
17. Source3 de Tanit : Source Ouzid ;

18. Puits Aguerd (prêt à fonctionner) ;
19. Source après Aguerd vers le SW de quelque dizaine de mètres (Ighzrounifis/Aghbalo) ;
20. Données perdues !

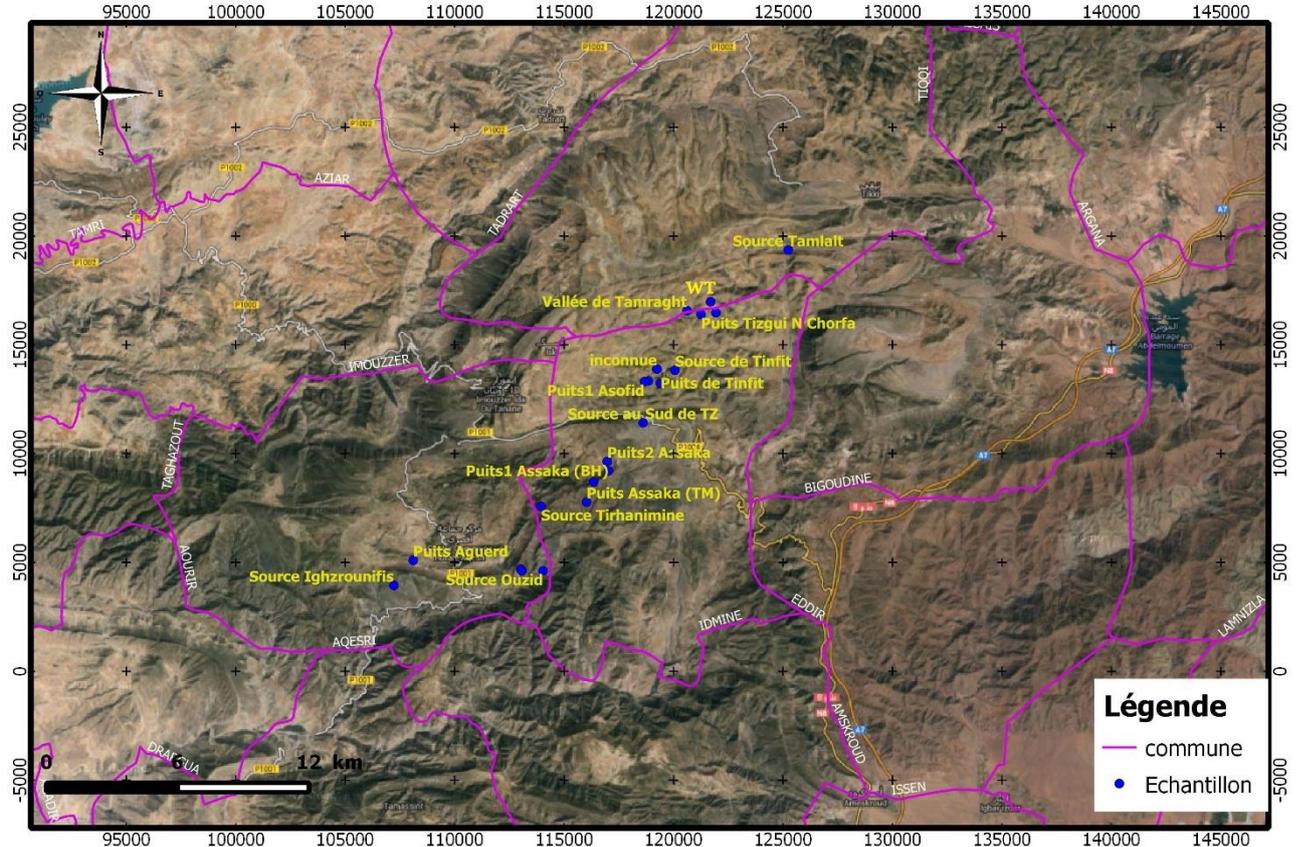


Figure31 : Carte de localisation des points d'eau échantillonnés.

A l'intérieur de la grotte, après le premier lac, nous avons installé le 16 Mars 2014 un auto-échantillonneur pour récolter un échantillon d'eau tous les 24 heures. Les échantillons récupérés ont fait l'objet d'**analyses isotopiques**, en plus des échantillons collectés jusqu'au 5^{ème} lac le jour de la visite spéléologique.

c. La Spéléologie

Une visite spéléologique d'un jour, a été organisé avec les professeurs Bouchaou et Berraouz et des spéléologues de l'ASS. L'objectif était l'installation d'un auto-échantillonneur, et l'échantillonnage de l'eau du réseau souterrain Win Timdouine jusqu'au 5^{ème} lac, pour l'analyses isotopiques précédemment mentionnés.



Image29, 30, 31&32 : Lors de la préparation, du déplacement et de l'installation de l'auto-échantillonneur au sein de la grotte.



Image33 : A l'intérieur de la grotte Win Timdouine.

3. Matériels utilisés

Pour l'interprétation des résultats des analyses, on est utilisé plusieurs logiciels, et applications d'informatique, parmi lesquels :

- Le logiciel D I A G R A M M E S, pour la plupart des interprétations hydrogéochimiques ;
- Le logiciel QGIS pour la réalisation de la carte des points d'eau échantillonnés.
- Le logiciel Adobe I L L U S T R A T O R, pour la réalisation des illustrations ;
- Le logiciel Adobe P H O T O S H O P, pour le traitement des images ;
- La base des données G O O G L E E A R T H, pour des images satellitaires et des données cartographiques.
- Le programme Office Excel, pour certains graphiques, et diagramme non réalisable par D I A G R A M M E S, ainsi qu'autres programmes dans sa série Office (Word, PowerPoint...).

i. Matériel utilisés *in situ*

Parmi les matériels utilisés *in situ*, pour la préparation de ce mémoire citant :

- o L'auto-échantillonneur, pour récolter les échantillons d'eau à intervalle régulier ;



Images34, 35, 36, 37&38 : L'auto-échantillonneur utilisé au cours de cette étude.

- o Appareil des mesures avec électrode de pH-mètre, électrode de conductimètre, et électrode pour la mesure du potentiel Redox ;
- o Dosage volumétrique par l'acide sulfurique, pour analyser les bicarbonates sur le terrain ;

- Les boussoles pour l'orientation et les mesures structurales ;
- Les marteaux pour récolter les échantillons de roches ;



Image39 : Un marteau utilisé lors des études géologiques.

- Les GPS pour déterminer les coordonnées géographiques ;
- Les cartes topographiques d'Imouzzer des Ida Ou Tanane (à l'échelle 1/50.000 et 1/100.000) pour se localiser ;
- Une carte géologique du Maroc (à l'échelle 1/1.000.000 publié en 1985) où, au moins, apparait la région ;
- Les combinaisons, les bottes, les casques, l'éclairage, les sacs et cordes... pour la spéléologie.



Image40 : Matériels spéléologiques au moment d'initiation pour l'entrée à la grotte.

ii. Matériels utilisés en laboratoire

Parmi les matériels utilisés au cours de la préparation de ce mémoire au laboratoire, citant :

- L'appareil des études isotopiques : IRIS Isotopes Stables, par Spectroscopie Infrarouge (PICARRO), pour analyser les isotopes de l'eau de Win Timdouine.



Images 41, 42, 43 & 44 : Appareil isotopique du LAGAGE, ainsi que la préparation des échantillons dans les chariots.

- Spectrophotomètre à U-V, pour analyser les nitrates et sulfates ;
- Spectrophotomètre à flamme, pour le potassium et le sodium ;



Image 45 & 46 : Spectrophotomètre à U-V (à droite), et spectrophotomètre à flamme (à gauche).

- Titrage par l'EDTA pour analyser le Titre Hydrotimétrique(THT), Magnésium plus Calcium (dureté totale), ainsi que le Calcium isolé ;
- Dosage volumétrique par le nitrate mercurique, pour analyser les chlorures ;
- Utilisation de verrerie du laboratoire, pour toutes les manipulations (Burettes gradués pour le titrage par l'EDTA, le nitrate mercurique, et l'acide sulfurique, Fioles jaugés à 50, 100, 200, 300, 500, et 1000ml, Pipettes et micropipettes gradués et jaugés, Propipettes, Erlenmeyers surtout à 50ml, Eprouvettes gradués, Entonnoirs de verre et de plastique, Bêchers...).

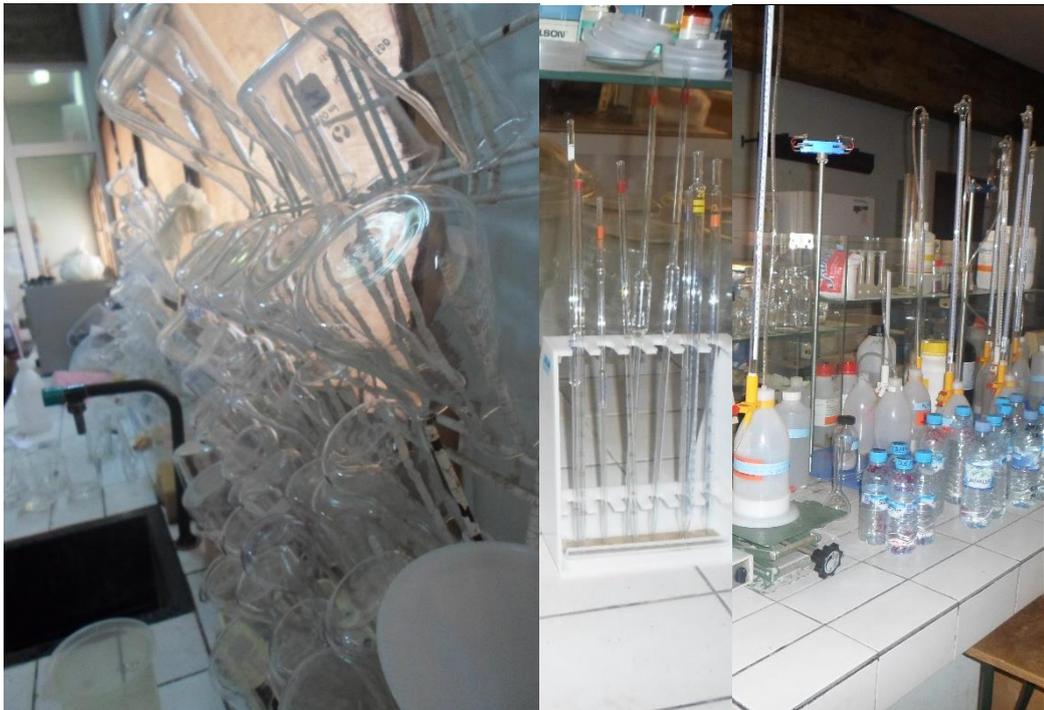


Image47, 48&49 : Parmi les verreries du LAGAGE.



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom : EZINI El Arabi

Année Universitaire : 2013/2014

Titre : LA RIVIERE SOUTERRAINE DE WIN TIMDOUINE (Haut Atlas Atlantique, Agadir Maroc) : Etude Hydrogéochimique et Spéléologique

Résumé

Le plateau de Tasroukht est un « bassin hydrogéologique » d'environ 16km² drainé essentiellement par la rivière souterraine de Win Timdouine. Cette rivière souterraine ne tarit jamais, et ses débits à la résurgence montrent des variations considérables, caractéristiques des sources à réponse immédiate.

La grotte des lacs « Win Timdouine », célèbre par son caractère karstique, est pleine de formes endokarstiques (stalactites, stalagmites, draperies, et gours...) et exokarstiques (vallées sèches, dolines, lapiaz, avens et travertins...).

Les eaux des sources de la région (Win Timdouine, Tinfit, Tirhanimine, Tanit, Aguerd...) et les puits environnants ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques et montrent une excellente qualité chimique des eaux de la source de Win Timdouine (401µs/cm) et une qualité moyenne des autres sources.

Les eaux de certains puits et sources sont chargées en sulfates surtout ceux du puits Aguerd (918,56mg/l), de la source de Tamlalt (498.13mg/l), du puits de Tizgui N Chorfa (454.40mg/l), et de la source de Tanguit (441.87mg/l). Ces sulfates sont issus de la dissolution des formations gypsifères du Jurassique.

Mots clés : Plateau de Tasroukht, Tazentoute, Win Timdouine, Imouzzer des Ida Outanane, Hydrogéochimie, isotopes, Karst, Jurassique, Maroc.