

UNIVERSITE CADI AYAD
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES MARRAKECH
Laboratoire de Géosciences et Environnement
Département des Sciences de la Terre
LST EAUX & ENVIRONNEMENT

Memoire de projet de fin d'étude Présenté pour obtenir le titre de :
LST EAUX & ENVIRONNEMENT

Apport de la bathymétrie dans le contrôle du volume d'eau des barrages
Exemple du barrage ARICHA
(Bassin de Bouregreg et de la Chaouia, Maroc)

Réalisé par :

DAOUDI Daoud

Encadré par :

Prof. CHAFIKI Driss

Dr. AMAR Mounir

Soutenu le 26/06/2014 devant le jury composé par :

Prof. CHAFIKI Driss (Encadrant interne)

Dr. AMAR Mounir (Encadrant externe)

Prof. IGMOULLAN Brahim (Examineur)

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents

Mes chers frères et sœurs ;

Ma petite et grande famille ;

Mes formateurs et formatrices

Tous mes amis (es) ;

*Et en particulier à toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser
ce rapport.*

REMERCIEMENTS

En premier lieu et avant d'aborder ce présent rapport je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

*Je présente mon profond respect au **Dr Mounir AMAR** mon parrain d'être toujours Soucié de ma compréhension des problèmes abordés. Merci de m'avoir accordé votre Confiance, cela a rendu mon travail d'autant plus intéressant et d'avoir pris le temps de Répondre à mes nombreuses questions.*

*Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements au **Dr Driss CHAFIKI** pour son soutien Constant, les encouragements et les orientations précieuses qu'il m'a données tout au long De cette période de stage.*

*A tous les enseignants de la filière « Eau et environnement à la faculté des sciences et techniques » Ainsi que tout personnel du Groupe Hydrogeo en particulier à Mr **OUABI Mohamed** le directeur et **NACIRI Saïd** et **MHIDI Brahim** techniciens topographe , pour la patience qu'ils ont manifesté à mon égard en répondant à*

toutes mes questions, leur sympathie et leur compréhension ont fait d'eux des Encadrant formidables durant ce stage.

Nomenclature et liste d'abréviation

Symbole	Désignation
Fig.	Figure
Tab.	Tableau
Mm ³	millions de m ³
ABHBC	Agence de bassin hydraulique de Bouregreg et de la Chaouia
Np	Niveau piézométrique
AEP	Alimentation en eau potable
DRPE	Direction des recherches et de planification des eaux
N	Nord
S	Sud
E	Est
W	Ouest
S.M.B.A	S idi M ohamed B en A bdellah
RTK	R eal T ime K inematic
SIG	Système d'information Géographique.

Sommaire

Dédicace.....	2
REMERCIEMENTS	3
Liste des figures.....	9
Liste des tableaux.....	10
Résumé.....	11
INTRODUCTION	12
<i>Chapitre I : Généralités</i>	<i>13</i>
1. Ressources en eau:.....	14
1.1. Les eaux des surfaces:.....	14
1.2. Les eaux souterraines:	15
1.3. L'utilisation des ressources en eau et leurs alternatives à l'avenir :	15
2. Problématique des barrages	16
3. Objectifs de la présente d'étude.....	16
4. Méthodologies de travail	17
4.1 Etape préliminaires:	17
4.2 Etape de prospection et de mesures sur le terrain:.....	17
A. Levé topo-bathymétrique :	17
A.1 Levé Topographique :.....	17
A.2 Levé bathymétrique :	18
4.3 Etape bureau:.....	18
<i>Chapitre II : Généralité sur le bassin versant de Bouregreg-Chaouia.....</i>	<i>19</i>
I. Introduction	20
II. Situation géographique.....	20
III. Caractéristique du bassin Bouregreg	21
III.1. Cadre géomorphologique :	21
III.2. Contexte climatique :	21
III.3. Contexte hydrologique:.....	23
III.4. contexte géologique.....	25
III.4.1. L'anticlinorium de Kasba Tadra-Azrou.....	25
III.4.2. Le synclinorium de Fourhal	25
III.4.3. L'anticlinorium Khouribga-Oulmès	26
III.4.4. Le synclinorium de Khémisset-Rommani	26

III.4.5. L'anticlinorium de Rabat-Tiflet :.....	26
<i>Chapitre III : Etude caractéristiques géographiques et géologiques de sous bassin versant de Barrage ARICHA</i>	28
I. Situation géographique de la zone d'étude :.....	29
But de l'ouvrage hydraulique étudié:.....	30
II. Descriptions du projet du barrage:.....	30
II.1. Climat :.....	30
II.2. Hydrologie au site du barrage :.....	30
II.2.1. Délimitation du bassin versant:.....	30
II.2.2. Caractéristiques morphométrique du bassin versant:.....	31
II.2.3. Paramètres géométriques :.....	33
➤ Indice de compacité de Gravellius "Kc":.....	33
➤ Coefficient d'allongement:.....	33
➤ Rectangle équivalent:.....	34
➤ Temps de concentration TC:.....	34
➤ Vitesse de ruissellement Vr :.....	34
II.2.4. Caractéristiques de l'écoulement:.....	35
➤ Module de l'écoulement.....	35
➤ Module de l'écoulement RELATIF :.....	35
➤ Lamme d'eau écoulée :.....	35
II.2.5. Etude des crues:.....	35
II.2.6. Conclusion :.....	36
II.3. Géologie de site :.....	36
II.3.1. Aperçu sur la géologie régional :.....	36
II.2.2 : La géologie du site et de la retenue :.....	36
<i>Chapitre IV : la bathymétrie (Principe et domaine d'application)</i>	40
Avant-propos.....	41
Introduction à la Bathymétrie.....	41
I. Définition et domaines d'application.....	42
II. Principe.....	42
II.1. Sondeur acoustique.....	43
a. Sondeur acoustique mono-faisceau.....	44
b. Sondeur acoustique multi-faisceau.....	44

II.2. Equipement du mono-faisceau	44
II.2.1. Architecture du système du mono-faisceau	45
a) Transducteur	45
b) Système de positionnement	47
III. Logiciel d'acquisition et logiciel de traitement	48
<i>Chapitre V : Calcul de Volume d'eau du barrage ARICHA</i>	49
I. Partie terrain : Levé topographique et bathymétrie de la zone d'étude.....	50
1. Equipement et montage de la conduite	50
A. Topographie	50
A-1. Levé topographique.....	50
A-2 Levé RTK.....	51
a) Configurer le type de levé.....	52
b) Configurer le récepteur de base	52
c) Configurer le récepteur mobile.....	52
d) Commencer le levé.	53
e) Terminer le levé.	53
B. Levé Bathymétrie.....	53
a) GPS	54
b) Echosondeur	54
C. Configuration des logiciels	54
a) EA400	54
b) HYPACK.....	55
c) Contrôle de la qualité des données bathymétriques.....	56
d) Levés et profils bathymétrie	57
II. Partie bureau : traitement et modélisation	59
1.1. Traitement des données : Hypack.....	59
1.2. Modélisation des données brutes: surfer.....	60
1.2.1. Présentation du logiciel Surfer.....	60
1.2.2. Interpolation par krigeage	61
1.2.2. Interpolation des données topographiques et bathymétriques du barrage ARICHA.....	62
III. Conclusion.....	64
<i>Chapitre VI : Taux D'envasement</i>	65
I. Definition.....	66

1. Problématique de l’envasement.....	66
2. Processus de la sédimentation	67
a) Erosion des bassins versants.....	67
b) Transport solide	67
c) Piégeage des sédiments et mécanisme de sédimentation.....	68
II. Calcul du taux d’envasement :.....	68
Conclusion générale.....	70
ANNEXES	72

Liste des figures

Figure 1 :Potentiel en eau de surface du Bassin de Bouregreg et de la Chaouia (en Mm3)	14
Figure 2 :Potentiel en eau souterraine du Bassin de Bouregreg et de la Chaouia (Mm3).....	15
Figure 3 :Localisation du bassin hydraulique bouregreg à Maroc(« secrétariat d'Etat chargé de l'Eau » Royaume du MAROC)	21
Figure 4 : précipitations mensuelles du bassin Bouregreg et de la Chaouia d'après DRPE, 2013	22
Figure 5 :Carte des isohyètes du bassin Bouregreg et de la Chaouia(Source DRPE, 2013).....	23
Figure 6 :Réseaux hydrographiques principaux du bassinBouregreg et de la Chaouia (d'après l' ABHBC).....	24
Figure 7:Carte géologique simplifié du bassin versant du Bouregreg (tirée de la carte géologique du Maroc au 1/1000 000 ème Notes et Mémoires N° 260 – carte publiée en 1985).....	27
Figure 8 :Situation géographique de la zone d'étude (Google imagerie, 2014).....	29
Figure 9 :Situation du bassin versant étudié par apport de la zone d'action de l' ABHBC	30
Figure 10 : Carte du bassin versant étudié au site du barrage (Via ArcView GIS 3.2).....	32
Figure 11 : Cadre géologique du secteur étudié (Editions du Service Géologique du Maroc Notes et Mémoires N°137 (1959) d'après J.Marçais).	38
Figure 12 : Coupes lithologique de la zone étudiée établie à partir des données de forages (DRPE, Forage 2701/28 et forage 2807/28 d'après Hammadi , 2000).....	39
Figure 13 : Principe du sondeur mono-faisceau.....	43
Figure 14 : Sondeur Mono-faisceau et le sondeur Multi-faisceau	44
Figure 15 :Equipement sur Zodiac (EA400, Hémisphère, PC, GPS, Batteries)	45
Figure 16 : Architecture du système du sondeur mono-faisceau	45
Figure 17 : Transducteur	46
Figure 18 : Gamme de fréquences et portées approximatives	46
Figure 19 : Hémisphères (ou bien antennes) du système de positionnement.....	48
Figure 20 : Installation du GPS, Base fixe.....	52
Figure 21 : EA400 Schéma de fonctionnement	55
Figure 22:Interface de l'HYPACK.....	56
Figure 23 : Contrôle de l'échelle de marrée	57
Figure 24 : Interface du logiciel Hypack lors du levé bathymétrique des profils	58
Figure 25 : Levé des profils bathymétriques et topographiques	58
Figure 26 : Interface de l'Hypack lors du traitement des données (suppression des points qui dépassent le niveau de plus hautes eaux.....	59
Figure 27 : Interface de logiciel Hypack lors L'exportation de fichier « ARICHA. X Y etZ »	60
Figure 28: Interface du Surfer lors du création du Grid d'interpolation.....	61
Figure 29 : Résultat de l'interpolation du plan coté initiale du barrage ARICHA considéré dans ce travail.	62
Figure 30 : Résultat de l'interpolation des données bathymétriques et topographique du barrage ARICHA : carte de contour des profondeurs de la retenue du barrage.	63
Figure 31 : Image satellite montre les différents niveaux d'eau du barrage Aricha (Google Earth)	64
Figure 32 : Profil théorique montrant le dépôt de vase dans la retenue d'un ouvrage hydraulique (d'après Remini B, 2003).....	66

Figure 33 : Profil montrant la zonation proposée pour le barrage Aricha étudié dans ce travail. Les tranches présentées sont calculées par la méthode bathymétrique 68

Liste des tableaux

Tableau 1 : Utilisation des ressources en eau en (Mm ³ /an)	15
Tableau 2 : Quantité des ressources en eau alternatives à l'avenir en (Mm ³ /an)	16
Tableau 3 : Répartition géographique du potentiel en eau global du bassin Bouregreg d'après l'ABHBC	25
Tableau 4 : Les paramètres morphométrique du bassin versant (via ArcView GIS 3.2).....	32
Tableau 5 : Débits de pointe pour les différentes périodes de retour des crues dans le bassin d'Aricha considéré.	36
Tableau 6 : Données des surfaces, volumes et les côtes des différents niveaux d'eau (Bureau d'étude Hydrogeo, 2014).	64

Résumé

Le bassin hydraulique de Bouregreg et de la Chaouia a fait l'objet de la construction des barrages qui ont permis une bonne mobilisation des eaux de surface et la couverture d'une partie des besoins en eau à utilisation divers.

Cependant ces ouvrages souffrent de plusieurs problèmes (envasement, pollution, eutrophisation, manque d'entretien,...) qui impactent la capacité de stockage et la qualité de l'eau.

Pour cette raison l'ABHBC a lancé des projets d'étude Topo-Bathymétrique de plusieurs petits et moyens barrages à savoir Aride, Aricha, Ain Kouachia, Zamrine, Dayat roumi, Rouidat et hassar pour calculer le volume d'eau et le taux d'envasement. C'est dans cette optique que s'inscrit cette étude.

Dans le cadre de mon projet de fin d'étude je me suis intéresser à l'étude topo-bathymétrique et à la définition des caractéristiques physiques du bassin versant d'oued Aricha afin de calculer le volume de la retenue ainsi le taux d'envasement.

Les volumes calculés, en définitif, sont aux environs de :

- **882738,93 m³** pour le volume de la retenue.
- **7229.27 m³** concernant la tranche morte liée à l'envasement.

Mots- clés : Bassin hydraulique, Bouregreg et de la Chaouia, Barrages d'ARICHA, ressources en eau, topo-bathymétrie, envasement.

INTRODUCTION

L'eau étant une ressource naturelle essentielle à la vie, les utilisateurs doivent être redevables quant à son utilisation ou à sa détérioration ?

L'eau prend une importance croissante dans notre vie. Apprendre à la gérer, c'est apprendre à maîtriser sa rareté mais aussi ses excès, à assurer l'alimentation en eau potable, agricole et industrielle, à l'utiliser pour créer de l'énergie et à maintenir la qualité de notre environnement. Cette gestion exige l'élaboration de méthodes adéquates et l'usage d'outils afin de minimiser les risques d'inondation et de stocker l'eau .

Le Maroc dispose des ressources en eau relativement importantes : le potentiel hydraulique mobilisable est estimé à 21 milliards de m³ (16 milliards de m³ d'eaux de surface et 5Milliard d'eaux souterraines).

Le Maroc est aussi "le pays de la grande hydraulique" puisqu'il s'est doté de plus de 100 grands barrages, la plupart édifiés depuis 1966.

La répartition inégale, dans le temps et dans l'espace de la pluviométrie et des ressources d'eau qu'elle génère, impose la construction de grands barrages réservoirs pour stocker les apports des années humides au profit de leur utilisation en années sèches. Il impose aussi la bonne gestion de ces ressources d'eau pour qu'elles durent dans le temps.

Chapitre 1 : Généralités

1. Ressources en eau:

1.1. Les eaux des surfaces:

Le bassin Hydraulique du Bouregreg comprend l'oued Bouregreg et ses affluents ainsi que les oueds côtiers notamment N'Fifikh, Malleh, Cherrat, Ykem, Aricha ...etc.

Les apports moyens sur le bassin sont évalués à 854 Mm³/an en moyenne, dont 674 Mm³ pour le seul bassin du Bouregreg (Fig. 1)

- Oued Bouregreg : 674 Mm³.
- Oueds côtières: 155 Mm³.
- Chaouia: 25 Mm³



Figure 1 : Potentiel en eau de surface du Bassin de Bouregreg et de la Chaouia (en Mm³)

1.2. Les eaux souterraines:

Concernant les ressources en eaux souterraines, les volumes exploitables au niveau des grandes nappes du bassin sont évalués à 75 Mm³.

La zone dispose de nappes souterraines dont la nappe de Berrchid est la plus importante. Parmi ces nappes, on distingue (Fig. 2):

- Nappe de Berrchid: 35.5 Mm³
- Nappe de la chaouia côtière: 37 Mm³
- Nappe du Temara: 15 Mm³
- Nappe de Sehoul: 2.5 Mm³
- Nappe de tanoubert

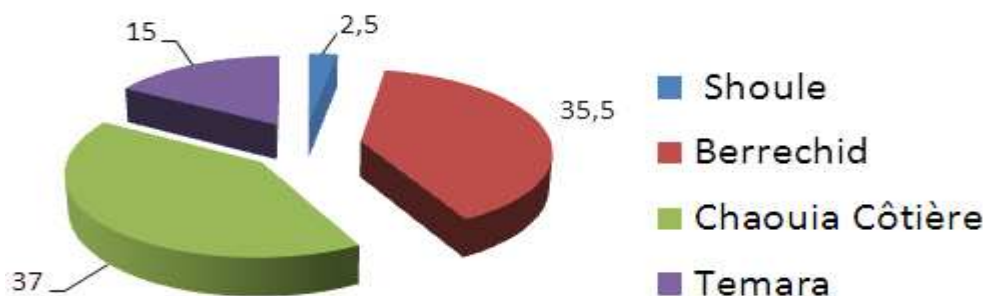


Figure 2 : Potentiel en eau souterraine du Bassin de Bouregreg et de la Chaouia (Mm³)

1.3. L'utilisation des ressources en eau et leurs alternatives à l'avenir :

Les ressources en eau mobilisées au niveau du bassin du Bouregreg sont principalement utilisées pour l'alimentation en eau potable, industrielle et L'irrigation (Tab.1).

Tableau 1 : Utilisation des ressources en eau en (Mm³/an)

utilisation des ressources en eau			
Utilisation actuelle		Utilisation future (2030)	
AEPI:	307Mm ³ /an	AEPI:	602Mm ³ /an
Irrigation:	203Mm ³ /an	Irrigation:	577Mm ³ /an
nappes locales:	69Mm ³		
grandes nappes:	105Mm ³		
eaux de surface:	15Mm ³		
Total :	500Mm³/an	Total:	1179Mm³/an

L'augmentation progressive de la population Ainsi des zones industrielle exige une demande d'eau importante, Voir **Annexe Tableau 1 et 2** dans ce cadre l'agence de bassin hydraulique de Bouregreg-Chaouia a élaboré une politique pour augmenter le volume d'eau tout en réalisent des stations de dessalement, d'épuration et des nouveaux barrages.

Le (Tab.2) montre les ressource en eau alternatives à l'avenir.

Tableau 2 : Quantité des ressources en eau alternatives à l'avenir en (Mm³/an)

Ressources en eau alternatives à l'avenir	
dessalement :	250Mm ³ /an
Transfert:	185Mm ³ /an en moyenne
Réutilisation des eaux Usées:	160Mm ³ /an

2. Problématique des barrages

Les barrages du Bouregreg assurent une bonne mobilisation des eaux de surface, la régulation des cours d'eau et la couverture d'une partie des besoins divers en eau.

Mais malheureusement certaines de ces infrastructures sont menacées par plusieurs problèmes (envasement, pollution, etc..) qui agissent d'une façon directe sur la retenue de ses ouvrages comme c'est le cas de la plupart des barrages à travers le monde.

Ces problèmes d'origines diverses, conduisent à la diminution de leur durée de vie et la perte permanente d'une capacité de stockage des volumes d'eau utiles à utiliser et la dégradation de sa qualité.

Ces problèmes peuvent être liés à l'agressivité climatique comme l'évaporation, l'érosion, et autres liées à la dégradation de l'environnement et/ou à une mauvaise gestion et suivi.

Ce qui les rend siège à toute sorte d'envasement et pollution.

Dans le cadre de notre recherche on va s'intéresser au problème de l'envasement de barrage ARICHA dans le bassin de Bouregreg et de la Chaouia.

3. Objectifs de la présente d'étude

Le Projet de cette étude est de calculer le taux d'envasement ainsi l'estimation de la durée de vie du barrage ARICHA, à l'aide de contrôle de volume d'eau par un levé bathymétrique

L'évaluation de cette problématique nécessite d'abord la maîtrise du contexte géologique, hydrologique et hydrogéologique de la zone d'étude.

Pour répondre à ces objectifs, le présent travail a été entrepris en plusieurs étapes :

- ✓ une étape préliminaire portant sur la consultation des documents préexistants ayant trait avec la problématique abordée;
- ✓ Une étape de prospection et de mesure sur le terrain qui consiste en la collecte de données brut ;
- ✓ Et une étape Bureautique consiste d'analyser, d'interpréter des données récoltées lors de l'étape précédente à l'aide des logiciels de traitement et rédaction du rapport.

Généralement ce travail sert à compléter les informations reçues pendant mes deux premiers stages, Assister à l'exécution des travaux au sein de l'entreprise privée, aussi bien au bureau que sur le terrain, afin de concrétiser les acquis en cours théoriques, exercer son savoir-faire et enrichir d'avantage les connaissances de l'étudiant.

4. Méthodologies de travail

4.1 Etape préliminaires:

Avant de sortir sur le terrain, on consulte la carte de repérage ou se trouve le projet et en prend un tirage de cette carte pour le besoin, il est nécessaire de rassembler au préalable toute documentation concernant le repérage, les coordonnées des points de rattachement, les titres riverains... etc.

Cette première étape consiste en une synthèse bibliographique axée sur les documents (publications, thèses, rapports, monographie...) et l'utilisation des programme existants traitant la géologie, la climatologie, les caractéristiques hydrologiques de sous bassin versant de barrage.

Les références des travaux : (Bureau d'étude Hydrogeo, ABHBC et DRPE).

Une fois les éléments de références sont rassemblés, on procède à une étude pour connaître la procédure du levé la plus convenable, après on prend le matériel nécessaire pour se rendre sur le terrain.

4.2 Etape de prospection et de mesures sur le terrain:

Cette étape correspond à une mission de terrain de quatre Jours. Les deux premiers jours ont fait un levé topographique, et on 'a clôturé par un levé bathymétrique.

A. Levé topo-bathymétrique :

A.1 Levé Topographique :

Dans les travaux topographiques auxquels on a participé, nous avons procédé en premier lieu à la reconnaissance du terrain de la propriété à lever, puis à la recherche du rattachement de projet et ceci en se basant sur les titres riverains.

Après on a procédé à l'opération de levé dans laquelle nous adoptons le levé par cheminement, alignement et rayonnement (levé par coordonnées polaires).

Le levé doit comprendre les points à des coordonnées (x, y, z) de détails à représenter sur le plan et qui sont déjà été mentionnés dans le croquis de bornage (constructions, murs, puits, pistes oued... etc.)

A.2 Levé bathymétrique :

Nous avons entamé le travail par :

- La création des profils sur le logiciel de Navigation Hypack avec un espacement entre eux bien déterminé en consultation avec L'ABHBC, en se basent sur les contours Topographique qui sont déjà réalisé dans la phase précédente.
- Après montage de équipement de travail (GPS, hémisphère, Ea400, transducteur, PC et batterie) sur le zodiac on commence la navigation en prenant en considération les profils déjà réalisé dans la phase précédente c'est-à-dire en on réalise des profils en travers et un profil de l'axe le long du plan d'eau, les zones couverte de végétation et ou la profondeur d'eau est faible ne sont pas concerné en vue de protégé le moteur du zodiac et le sabot de l'échosondeur.
- les résultats finals est une carte bathymétrique prête à traiter et analyser ultérieurement dans la phase bureau.

4.3 Etape bureau:

C'est la phase de traitement, modélisation et interprétation en utilisant des logiciels spécifiques :

- Traitement des données:

Hypack : ce logiciel permet, outre l'intégration des différentes données et la planification des levers, de faire différents traitements sur ces données, afin d'éliminer les artefacts, les mesures aberrantes ou d'intégrer différents paramètres extérieurs.

- Modélisation des données brutes:

Surfer 10 : Le logiciel, conçu par Golden Software, nous permet de réaliser des modèles numériques de terrain (MNT) issus des données que nous aurons récoltées sur le terrain via les études topographiques et bathymétriques.

*Chapitre II : Généralité sur le bassin versant de
Bouregreg-Chaouia*

I. Introduction

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Le temps de concentration qui caractérise en partie la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à des précipitations est influencé par diverses caractéristiques morphologiques : en premier lieu, la taille du bassin (sa surface et son périmètre), sa forme, son élévation, sa pente et son orientation. A ces facteurs s'ajoutent encore le type de sol et de substratum (géologie), le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique. Ces facteurs, d'ordre purement géométrique ou physique, s'estiment aisément à partir de cartes adéquates ou en recourant à des techniques digitales et à des modèles numériques.

II. Situation géographique

De forme elliptique, le bassin versant du Bouregreg couvre une superficie totale de l'ordre de 9770 km², soit environ 50 % de la surface totale de la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia (Fig. 3).

Sur le plan administratif, il s'étend en totalité sur la Wilaya de Rabat-Salé et partiellement sur les provinces de Khémis et de Khénifra. Il est limitrophe dans sa partie « Nord » du bassin versant de l'oued Beht, affluent rive gauche du Sebou et dans sa partie « Sud » par le bassin de l'oued Oum Er Rbia.

Il est constitué dans sa majeure partie de collines et de plateaux, s'abaissant progressivement vers le Nord. Son altitude s'échelonne du niveau zéro de la mer à 1726 m, culminant à JbelMtourgane, avec 50% de la superficie ayant des altitudes variables entre 500 et 1000 m.

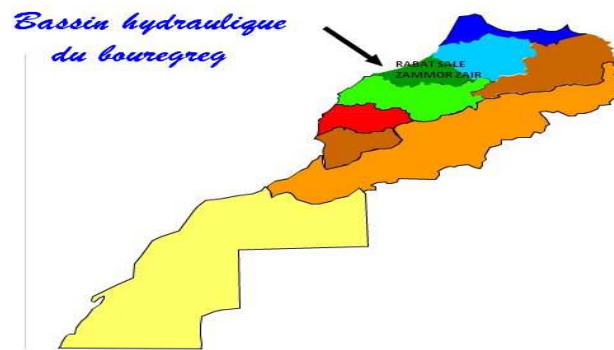


Figure 3 : Localisation du bassin hydraulique bouregreg à Maroc (« secrétariat d'Etat chargé de l'Eau » Royaume du MAROC)

III. Caractéristique du bassin Bouregreg

III.1. Cadre géomorphologique :

Sur le plan géomorphologique, le bassin du Bouregreg est composé de deux parties distinctes :

- ✓ la zone de montagne à topographie haute, ondulée et à vocation pastorale, qui s'étend sur le haut Bouregreg ;
- ✓ la région des plateaux des Zaires sous forme de plaines sillonnées par de profondes vallées.
- ✓ D'une pente moyenne faible de l'ordre de 0.60 %, le bassin du Bouregreg est subdivisé en deux parties contrastées à savoir :
 - la partie Nord-est, qui correspond au bassin du Bouregreg proprement dit ;
 - la partie Sud-ouest, correspondant au bassin de son principal affluent rive gauche, l'oued Grou et ses affluents secondaires (oueds Korifla et Akreuch).

III.2. Contexte climatique :

La géographie du bassin se caractérise par trois composantes principales, ayant marqué de leur empreinte le climat : l'altitude, l'extension de la latitude et l'ouverture sur la façade atlantique. L'effet de l'altitude se manifeste au Nord-est où le haut Bouregreg culmine à 1627 m au droit de Jbel Mtourzgane, par des précipitations fréquentes et intenses, comparativement aux plaines.

L'extension de la latitude génère un Nord-est assez tempéré et un Sud-ouest semi-aride, alors que les côtes atlantiques assurent à leur voisinage, plus d'humidification et une modération des températures.

D'autre part, le climat de la région est influencé par la circulation de deux masses d'air :

- -L'air continental venant du Sahara, sec et chaud ;
- -L'air humide et instable provenant de l'anticyclone des Açores, de direction Sud-ouest.

La saison chaude correspond à la période comprise entre avril et octobre, alors que la saison froide se situe entre novembre et mars. La zone de montagne enregistre des températures extrêmes avec plus de 33.8°C l'été et moins de 3°C l'hiver. La zone côtière reste modérée avec une température moyenne qui ne descend pas en dessous de 12°C l'hiver et qui n'excède pas les 24°C l'été. D'après DRPE

Les précipitations qui tombent dans le bassin du Bouregreg sont estimées, en moyenne, à 440 mm. Le nombre de jours de pluie par an oscille entre 60 et 75 pour les zones situées entre les massifs montagneux et l'océan, mais se situe entre 75 et 100 dans la zone de montagne (Fig. 5).

Généralement, les pluies diminuent avec la latitude selon un gradient faible, Elles passent de 480 mm/an à Rabat à en dessous de 370 mm/an à l'extrême Sud-ouest du bassin. Par ailleurs, l'altitude est à l'origine d'un contraste très marqué entre la partie Nord-est du bassin du Bouregreg où la pluviométrie culmine à 760 mm/an et la partie Sud-ouest où elle chute en dessous de 350 mm/an. (Fig. 4 et 5) (Données tirées de la DRPE)

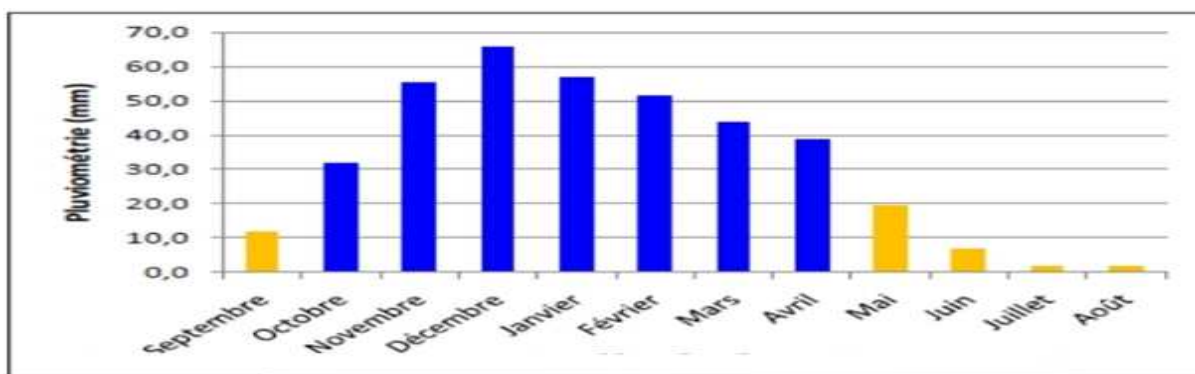


Figure 4 : précipitations mensuelles du bassin Bouregreg et de la Chaouia d'après DRPE, 2013

La répartition moyenne des précipitations mensuelles montre l'existence de deux saisons pluviométriques distinctes :

- une saison humide, allant du mois d'octobre à avril où a eu lieu la quasi-totalité des épisodes pluvieux (86 à 92% de la pluviométrie annuelle) ;
- une saison sèche, allant du mois de mai à septembre, avec seulement 8 à 14 % de la pluie annuelle.

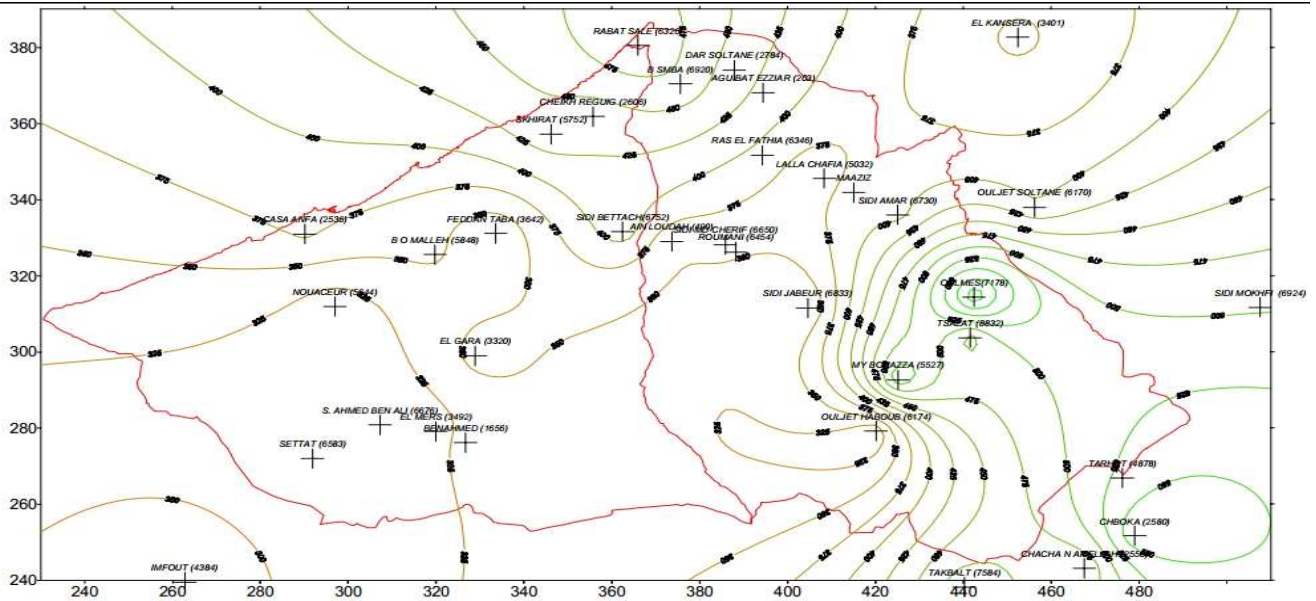


Figure 5 : Carte des isohyètes du bassin Bouregreg et de la Chaouia (Source DRPE, 2013)

Evaporation :

Les valeurs moyennes de l'évaporation rencontrées dans la zone sont de :

- 1600 mm/an dans la zone côtière de Rabat-Salé ;
- 800 mm/an dans le haut Bouregreg.

III.3. Contexte hydrologique:

Le réseau hydrographique du bassin Bouregreg est assez développé. Il se compose de deux principaux oueds à savoir :

- L'oued Bouregreg, proprement dit qui draine une superficie de 3.830 Km², correspondant à la partie Nord-est du bassin ;
- L'oued Grou et ses affluents, Korifla et Akreuch qui drainent La partie Sud-ouest, d'une superficie totale de 5.760 km²

La carte de la figure 6 ci-après présente les réseaux hydrographiques principaux :

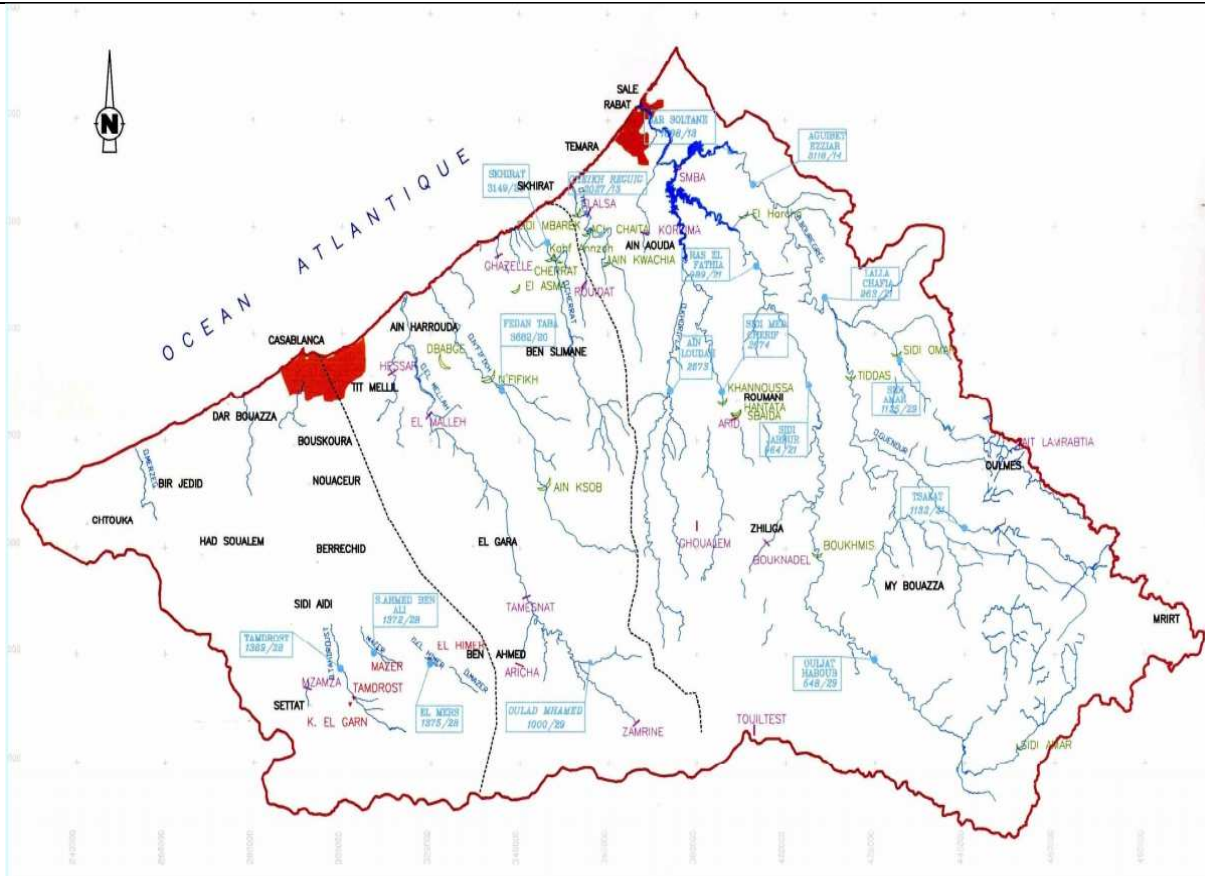


Figure 6 : Réseaux hydrographiques principaux du bassin Bouregreg et de la Chaouia (d'après l'ABHBC)

Au total, 10 stations hydrologiques dont une automatique et six autres équipées de postes d'annonce de crues, permettent de contrôler les écoulements de surface, générés au niveau du bassin du Bouregreg et de ses affluents. Ces écoulements, de régime intermittent, sont caractérisés par une grande variabilité aussi bien dans le temps que dans l'espace.

Les apports d'eau du bassin sont étroitement liés aux précipitations. Ils sont importants en période de crues et quasiment nuls pendant la saison sèche. Les analyses statistiques ne montrent que 80 à 90 % des apports d'eau annuels sont produits entre Décembre et Avril et les 10% restant sont observés en dehors de cette période.

Le potentiel en eau global du bassin Bouregreg est évalué à 680 Mm³ par an, réparti géographiquement comme indiqué dans le tableau ci-après (Tab.3):

Tableau 3 : Répartition géographique du potentiel en eau global du bassin Bouregreg d'après l'ABHBC

Stations	Oueds	Bassin(Km ²)	Ecoulement	
			m ³ /s	Mm ³ /an
Lalla Chafia	Bouregreg	3230	7.26	3230
Sidi Jabeur	Grou	3110	4.54	145
Ain Louddah	Korifla	636	0.79	25
S.M.B.A	Bouregreg	9590	21.59	680

III.4. contexte géologique

La connaissance de la géologie d'un bassin versant s'avère importante pour cerner l'influence des caractéristiques physiographiques. La géologie du substratum influe non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine mais également sur le ruissellement de surface. Dans ce dernier cas, les principales caractéristiques géologiques à considérer sont la lithologie et la structure tectonique du substratum.

Le bassin versant du Bouregreg appartient dans son ensemble au massif central marocain. Ce dernier est le plus septentrional et le plus important des bombements du socle hercynien du Maroc atlantique. Le bassin versant du Bouregreg occupe dans sa globalité environ 90% du massif central marocain et il y couvre plusieurs structures géologiques. Ainsi de l'amont vers l'aval du bassin Voir (Fig.7), on distingue :

III.4.1. L'anticlinorium de Kasba Tadla-Azrou

Il constitue la partie haute du bassin versant de Bouregreg. Il s'agit en fait d'une véritable mosaïque d'anticlinaux faillés d'inégale ampleur où affleurent des roches s'étageant du Précambrien au Dévonien et entre lesquels s'étalent les dépressions discordantes et synclinales du Carbonifère (Termier, 1936 ; Bouabdelli, 1989). Les assises continentales du Permien de Khénifra recouvrent en discordance angulaire la partie centre orientale de cet ensemble complexe.

III.4.2. Le synclinorium de Fourhal

C'est une gouttière synclinale qui, du Nord de Boujad au Causse d'Agourai, expose à l'érosion les grès et les schistes viséens, namuriens et westphaliens (Tahiri, 1991). Son flanc oriental est percé par l'intrusion granitique de Ment.

III.4.3. L'anticlinorium Khouribga-Oulmès

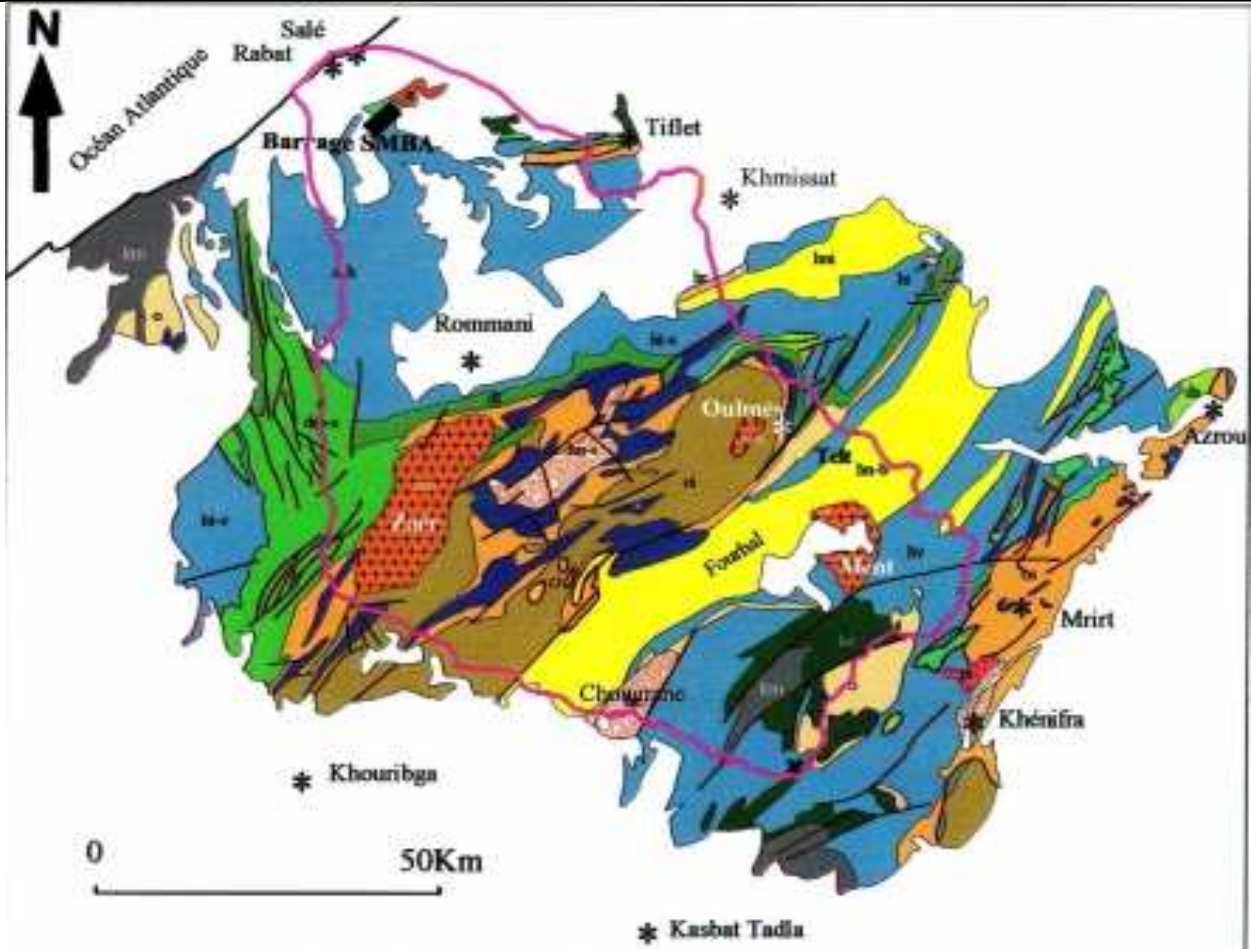
Il forme le centre du bassin versant du Bouregreg. Orienté NE-SW Ouest, il porte en hauteur les couches surtout schisteuses et quartzitiques de l'ordovicien et du Silurien, sur lesquelles se plaquent quelques écharpes détritiques et/ou carbonatées du Carbonifère (Piqué, 1979 ; Chakiri, 1991 ; Tahiri, 1991). Plusieurs massifs de granitoïdes s'y mettent en place ; on peut citer celui de Zaër, d'Oulmès et de Moulay Bou Azza.

III.4.4. Le synclinorium de Khémisset-Rommani

C'est une épaisse masse synclinale essentiellement constituée par des assises schisto-gréseuses du Carbonifère inférieur (Tournaisien et Viséen) et des argilites et basaltes du Trias. L'ensemble est parfois érodé au passage d'anticlinaux où affleurent les formations du Dévonien (Chakiri, 1991 ; Zahraoui, 1991).

III.4.5. L'anticlinorium de Rabat-Tiflet :

C'est une remarquable structure orientée Est-Ouest, où un granite cataclaté et des roches métamorphiques calédoniens affleurent à la faveur d'accidents (Piqué, 1979 ; El Hassani, 1990).



Barrage SMBA: Barrage Sidi M^{ed} Ben Abdellah

	Post Paléozoïque		s Silurien
	hr Permien continental		o Ordovocien non subdivisé
	hn-s Namurien, Westphalien et/ou Stéphanien		ou Ordovocien supérieur
	hn-b Namuro-Bashkiriën		oi Ordovocien inférieur
	hni Namurien inférieur		k-o Cambro-ordovicien
	hv Viséen		km Cambrien moyen
	ht-v Dinantien non subdivisé		x Précambrien présumé
	d-h Dévono-Dinantien		pt Complexe volcanique de Khénifra (Rhyolites, dacites, Latites et trachy-andésites (Autunien ou Stéphanio-Permien)
	d Dévotion non subdivisé		yr Granite tardé hercynien de Mont (252 MA)
	ds Dévotion supérieur		yhs Granites de Zaïr et d'Oulmès (275 à 295 MA)
	dm-s Dévotion moyen-supérieur		
	di Dévotion inférieur		

Figure 7: Carte géologique simplifiée du bassin versant du Bouregreg (tirée de la carte géologique du Maroc au 1/1000 000 ème Notes et Mémoires N° 260 – carte publiée en 1985)

*Chapitre III : Etude caractéristiques géographiques
et géologiques de sous bassin versant de Barrage
ARICHA.*

I. Situation géographique de la zone d'étude :

Le site du barrage se trouve à l'est de la ville de Benahmed et à 1.5 Km au nord du village El Hjirat (Fig. 8).

Il est repéré sur la carte Topographique au 1/50 000 de Mgarto (NI 29 XI 2b) par les coordonnées Lambert suivantes :

$$X = 339.400 \quad Y = 278.250 \quad Z = 560$$

L'accès au site se fait par la route secondaire n°112 à la R.P 13, jusqu'au village d'el hajrat ; On emprunte une piste sur 1.5 Km qui mène sur la rive droite de l'oued Aricha, à proximité du site projeté.



Figure 8 : Situation géographique de la zone d'étude (Google imagerie, 2014)

But de l'ouvrage hydraulique étudié:

Le barrage (digue homogène, Annexe Tab.3.4.5.6) projeté sur l'oued Aricha est un barrage permettra de créer une réserve d'eau pour l'irrigation des périmètres agricoles située sur le plateau et à l'abreuvement du cheptel.

II. Descriptions du projet du barrage:

II.1. Climat :

La moyenne annuelle passe de 350 mm au Nord à 150 mm au Sud (d'après DRPE). Cette pénurie d'eau, avec tous les aléas qu'elle induit, empêche toute pratique de cultures rentables et entrave la mise en valeur de vastes terres fertiles.

La promotion convoitée, se heurte à d'importantes contraintes dont la plus significative est constituée par la forte pénurie d'eau que connaît cette région. En effet, la pluviométrie est faible et mal répartie dans le temps et dans l'espace :

II.2. Hydrologie au site du barrage :

II.2.1. Délimitation du bassin versant:

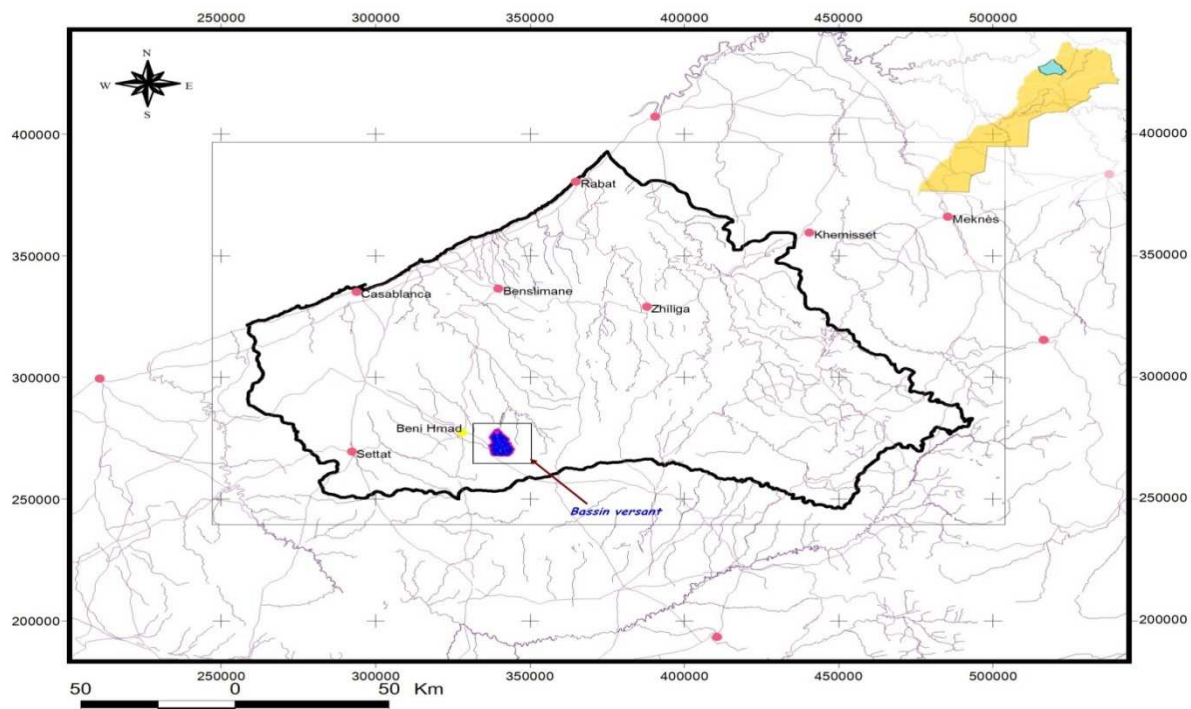


Figure 9 : Situation du bassin versant étudié par apport de la zone d'action de l'ABHBC

Un bassin versant ou bassin hydrologique est un espace géographique dont les apports hydriques naturels sont alimentés exclusivement par les précipitations, et dont les excès en canaux ou

en matières solides transportés par l'eau forment, en un point unique dans l'espace, une embouchure ou un exutoire.

La délimitation du bassin (Fig. 9) se fait avec plusieurs logiciels ArcView, ArcMap...etc. Généralement, un bassin versant est déterminé par sa morphologie, et essentiellement par les lignes de crêtes topographiques et de partage des eaux.

La détermination de ces caractéristiques morphométrique est nécessaire pour analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant (lame d'eau précipité, débit de la rivière...etc.)

II.2.2. Caractéristiques morphométrique du bassin versant:

La délimitation a été basée sur les cartes topographiques et sur l'utilisation du modèle numérique de terrain aster de 30 m de résolution Cette délimitation a abouti à un bassin versant de 50,04 km² (Fig. 10 et Tab.4).

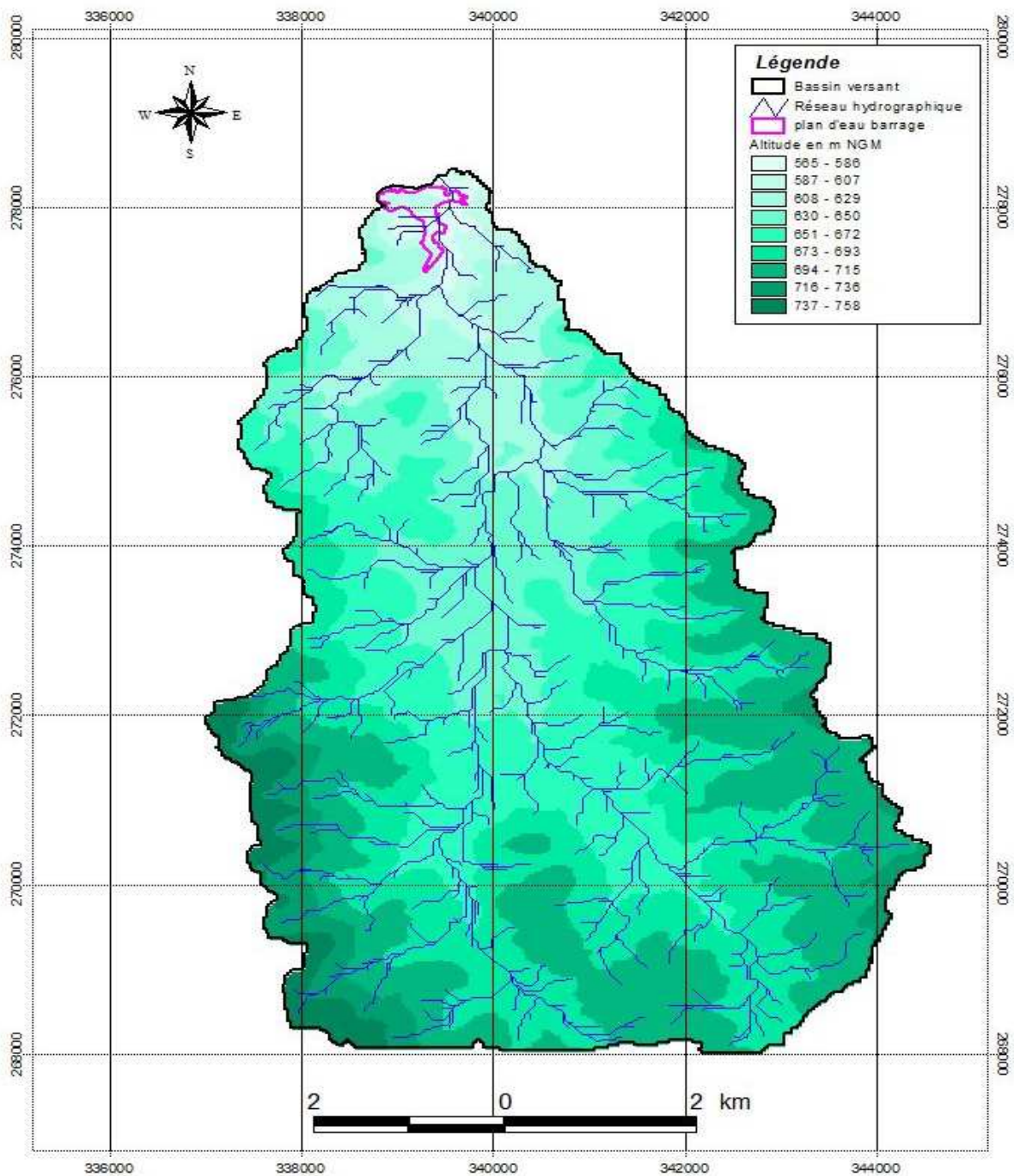


Figure 10 : Carte du bassin versant étudié au site du barrage (Via ArcView GIS 3.2)

Les résultats des calculs sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Les paramètres morphométrique du bassin versant (via ArcView GIS 3.2)

Centroïde	X= 340780.6 Y = 273249.4
Surface	50,04 Km ²
Périmètre	43,312 Km

La plus long cours d'eau	14,307 Km
Côte moyenne (altitude)	671.46 NGM
Pente moyenne	3.062°
L'apport moyen annuel	16264421,6160725 m³/an

II.2.3. Paramètres géométriques :

➤ Indice de compacité de Gravellius "Kc":

Cet indice exprime la forme du bassin versant, il est en fonction de la surface du bassin et de son périmètre.

$$Kc = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Avec : P: périmètre du bassin versant (Km) ;

S: superficie du bassin versant (Km²) ;

Si : * KC = 1 ; le bassin versant est ramassé

* KC > 1 ; le bassin est allongé.

Dans notre cas, l'indice de compacité de Gravellius calculé est de :

$$Kc = 1.87$$

Le bassin versant de l'Oued Aricha présente donc une forme allongée.

➤ Coefficient d'allongement:

Ce coefficient est obtenu par la relation :

$$Ca = \frac{L^2}{S}$$

L : la longueur du talweg principal L = 14.307 km

S : la superficie du bassin versant. S = 50,04 Km²

$$\text{Donc : } Ca = 4.09$$

Le bassin est quatre fois plus long que sa largeur alors le temps de rassemblement des eaux vers l'exutoire sera long.

➤ Rectangle équivalent:

On assimile notre bassin à un rectangle défini par sa longueur "L", sa largeur "l" est la même superficie du bassin versant "S".

$$L = \frac{Kc \sqrt{S}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right]$$

$$l = \frac{Kc \sqrt{S}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right]$$

$$L=21.26 \text{ Km} \& l=2.35 \text{ Km}$$

Cette notion de rectangle équivalent a été introduite par avoir l'influence des caractéristiques géométries du bassin sur l'écoulement.

➤ Temps de concentration TC:

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée du bassin pour arriver à l'exutoire. Différentes méthodes ont été définies pour déterminer le temps de concentration, la formule usuelle utilisée au Maroc est décrites ci-dessous :

- Formule de Van Te Chow

$$Tc = 60 * 0.123 * \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0.64}$$

Avec : Tc: Temps de concentration en min ;

L: Longueur du plus long talweg en Km;

I : Pente en m/m ;

Les résultats de calcul du temps de concentration par la méthode de van te Chow est données par :

$$Tc = 103.77 \text{ Min}$$

Alors le temps de concentration est assez rapide

➤ Vitesse de ruissellement Vr :

$$Vr = \frac{LP}{Tc} (\text{Km/h}).$$

Avec : L_p : Longueur du cours d'eau principal (Km) ;

T_c : Temps de concentration (h).

$$V_r = 0.13$$

Alors la vitesse de ruissellement est très faible.

II.2.4. Caractéristiques de l'écoulement:

➤ Module de l'écoulement

Il est donné par : $M_e = A_{moy} / T$

A_{moy} : Apport moyen annuel (m^3).

T : Temps d'une année en secondes $T=1314000$ s

$$\text{Donc : } M_e = 0.51 \text{ m}^3/\text{s}$$

➤ Module de l'écoulement RELATIF :

$$\text{On a : } M_{er} = M_e / S$$

M_e : Module de l'écoulement (m^3/s)

S : Superficie du bassin (Km^2)

$$\text{Donc : } M_{er} = 0.01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{Km}^2$$

➤ lame d'eau écoulée :

La lame d'eau est une mesure d'écoulement des précipitations atmosphériques au sein du bassin versant d'un cours d'eau. Le résultat est donné en millimètres (mm), pour faciliter la comparaison avec la précipitation tombée.

On a $L_e = A_{moy}/S$

$$\text{Donc : } L_e = 0.33\text{m}$$

Alors la hauteur de l'eau écoulée sur le bassin versant de Aricha si en étalée sur tout la superficie est 0.33 m

II.2.5. Etude des crues:

La crue est une augmentation, un accroissement du débit / de la hauteur d'eau en écoulement d'un cours d'eau, qui provoque un débordement de son lit mineur et une inondation de zones plus ou

moins éloignées des rives, dans une zone inondable. L'estimation des crues révèle une grande importance pour la sécurité de l'ouvrage à implanter.

Les paramètres définissant une crue sont:

- Le débit maximum de la crue (débit de pointe) ;
- Le volume de la crue;
- La forme de la crue (Hydrogramme de crues) ;
- Le temps de base;

Les débits de pointe et les volumes des crues pour différentes périodes de retour sont donnés dans le tableau ci-après :

Tableau 5 : Débits de pointe pour les différentes périodes de retour des crues dans le bassin d'Aricha considéré.

Période de retour (ans)	Débit de pointe (m ³ /s)	Volume (10 ⁶ m ³)
100	100 à 150	1 à 2 millions
1000	150 à 250	2 à 3 millions
5000	250 à 300	3 à 4 millions

II.2.6. Conclusion :

L'ensemble des principales caractéristiques physiques ont donc une forte influence sur la répartition Spatio-temporelle des précipitations et des débits au sein de bassin versant étudié.

II.3. Géologie de site :

II.3.1. Aperçu sur la géologie régional :

La zone du projet est située au sud du massif central constitué par une succession de plateaux séparés par les entailles profondes des oueds Malah, Zamrine ... Le substratum est constitué par les terrains paléozoïques arasés par l'érosion.

Le paléozoïque est recouvert en discordance au sud par les terrains mi pliocène crétacé.

Sur les plateaux, le substratum affleure rarement, il est observable à la faveur des entailles des oueds qui le découpent.

II.2.2 : La géologie du site et de la retenue :

Le site et sa retenue se développent sur les formations schiste-gréseuses voir quartzitique du paléozoïque. Le substratum n'affleure pas au droit du site :

En rive droite, la formation schiste-gréseuse est subaffleurant, elle est masquée par les éboulis de pente de faible épaisseur (0.50m) en moyenne. L'altération est très faible au pied de la rive, elle descend plus en profondeur vers le haut de la rive, et particulièrement lorsqu'il s'agit de niveaux gréseux.

En rive gauche, une épaisse masse d'éboulis argileux masque cette rive, l'épaisseur pouvant aller jusqu'à 5.00 m. L'altération comme en rive droite est faible au pied de la rive et intéresse une plus grande épaisseur en haut de la rive.

La carte géologique de la figure 11 et les coupes de la figure 12 ci-dessous présentent la géologie et la lithologie de la zone étudiée :

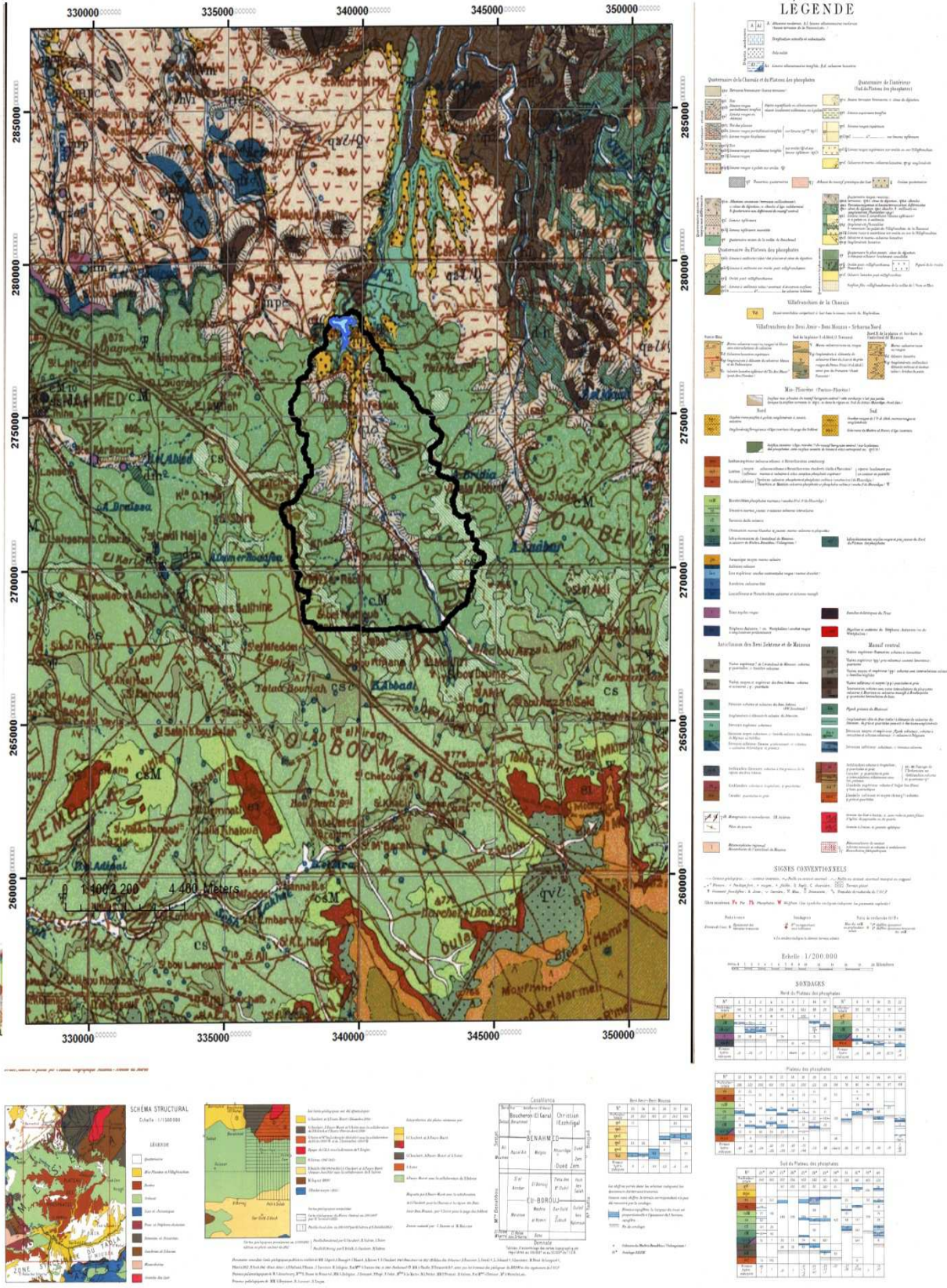


Figure 11 : Cadre géologique du secteur étudié (Editions du Service Géologique du Maroc Notes et Mémoires N°137 (1959) d'après J.Marçais).

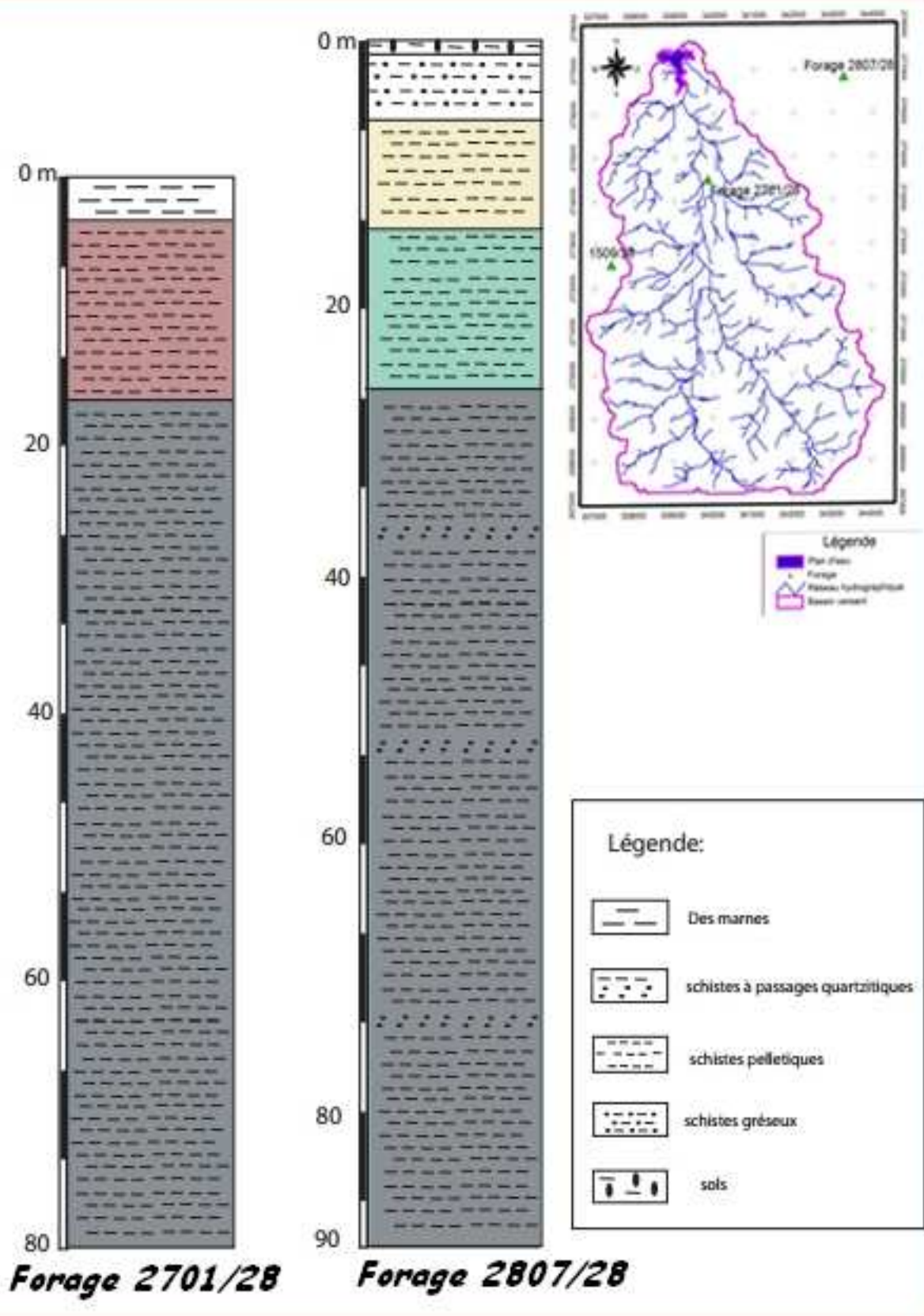


Figure 12 : Coupes lithologique de la zone étudiée établie à partir des données de forages (DRPE, Forage 2701/28 et forage 2807/28 d’après Hammadi , 2000)

*Chapitre IV : la bathymétrie (Principe et domaine
d'application)*

Avant-propos

La géophysique est une grande discipline des sciences de la Terre. Elle concerne l'étude des caractéristiques physiques de la Terre, ou d'autres planètes, utilisant des techniques de mesures indirectes (gravimétrie, géomagnétisme, sismologie, radar géologique, résistivité apparente, etc.). La géophysique aquatique débranche de cette grande discipline en gardant les mêmes principes. La tranche d'eau constitue le paramètre qui conditionne l'équipement et la méthode d'acquisition.

Selon l'utilité et selon les objectifs des projets plusieurs techniques ont été développées :

1. Bathymétrie
2. Sonar à Balayage Latéral
3. Sismique réflexion
4. Sismique réfraction...

Introduction à la Bathymétrie

L'acquisition de la profondeur d'eau disponible a d'abord été une question vitale pour les navigateurs, tout d'abord pour une question de sécurité. Les premiers marins essayaient déjà de déterminer des routes de navigation en adéquation avec leur tirant d'eau. Pour cela, des sondages ponctuels à l'aide d'un poids et d'une corde graduée étaient majoritairement utilisés.

Depuis cette époque, les techniques de lever des points situés sous la surface de l'eau ont quelque peu évolué, avec l'apparition au début du vingtième siècle des sondeurs acoustiques. Ces sondeurs utilisent la mesure du temps de parcours d'une onde acoustique dont on connaît la vitesse pour déterminer la distance qui sépare le sondeur du fond. Nous verrons ultérieurement les principes physiques qui régissent le fonctionnement de ces appareils.

C'est probablement le déclenchement de la Première Guerre Mondiale qui a mis en évidence le besoin absolu de détecter des objets sous l'eau, comme des sous-marins ou d'autres bâtiments ennemis. Durant la première moitié du vingtième siècle, les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique ont accéléré encore le développement des sondeurs bathymétriques et des sonars.

I. Définition et domaines d'application

La bathymétrie est la science de la mesure des profondeurs de l'océan, des barrages et des lacs, afin de déterminer leur topographie du sol.

Cette technique, en termes de moyens d'étude, on peut la classer de point de vue résultats dans la discipline de la Topographie et de point de vue principe dans la discipline de la Géophysique. En terme objet d'étude elle fait partie de la discipline d'Hydrographie.

Les domaines d'application de cette technique sont divers :

- Interprétation de phénomènes naturels (géologie, cartographie des habitats, océanographie...);
- Cartographie pour la sécurité de la navigation (Hydrographie);
- Exploitation des océans (aménagement portuaires, industrie pétrolière, câbles sous-marin, pêche ...);
- Divers autre application : archéologie sous-marine, recherche d'épaves, délimitation du plateau continental juridique, militaires ...
- Cartographie des fonds des barrages pour le calcul de volume d'eau et le calcul de taux d'envasement...

II. Principe

Le principe de la bathymétrie par un échosondeur consiste à l'envoi et la réception d'un signal acoustique qui se réfléchit au fond.

L'échosondeur acoustique détermine la profondeur (P) en calculant la profondeur suivant la formule :

$$P = c \Delta t / 2$$

Δt : temps double (aller-retour du signal)

Avec « c » vitesse de propagation du son (célérité des ondes acoustiques).

$$\text{Et } c = D / \Delta t \text{ (m/s)}$$

NB : ne pas confondre célérité (vitesse de propagation de l'onde acoustique) et vitesse acoustique particulière (vitesse de vibration des particules autour de leur position au repos).

La célérité varie d'un milieu à un autre:

- c (air) ≈ 340 m / s
- c (eau de mer) ≈ 1500 m/s
- c (béton) ≈ 3100 m / s
- c (acier) ≈ 5700 m / s

Dans l'eau, la célérité varie en fonction de la **température (T)**, la **salinité (S)** et la **pression (P)** ($1450 < c < 1550$).

- $\Delta T = 1^\circ\text{C} \rightarrow \Delta c = 3$ m/s
- $\Delta S = 0,1 \text{ \%} \rightarrow \Delta c = 1$ m/s
- $\Delta P = 100$ m $\rightarrow \Delta c = 1,7$ m/s

Modèle de calcul de la célérité : $c = f(T, S, P)$

Ex : modèle de Medwin (1975) ($P < 1000$ m)

$$C = 1449,2 + 4,6 T - 0,055 T^2 + 0,00029 T^3 + (1,34 - 0,01T) (S-35) + 0,016 P$$

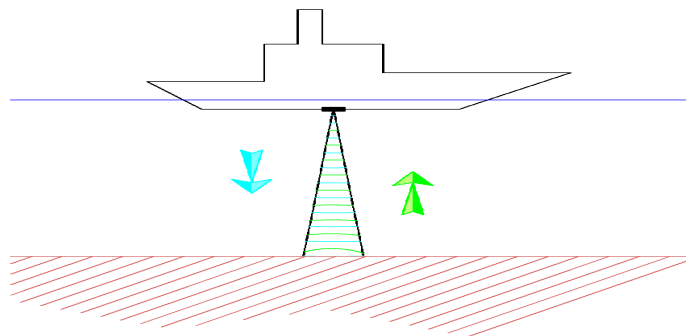


Figure 13 : Principe du sondeur mono-faisceau

II.1. Sondeur acoustique

Deux types de matériels sont utilisés au Maroc, le Mono-faisceau et le Multi-faisceau. Ce dernier est le plus performant, il permet d'explorer plusieurs couloirs, avec une meilleure résolution, en un seul profil de navigation alors que le Mono-faisceau nous permet d'explorer qu'un seul couloir.

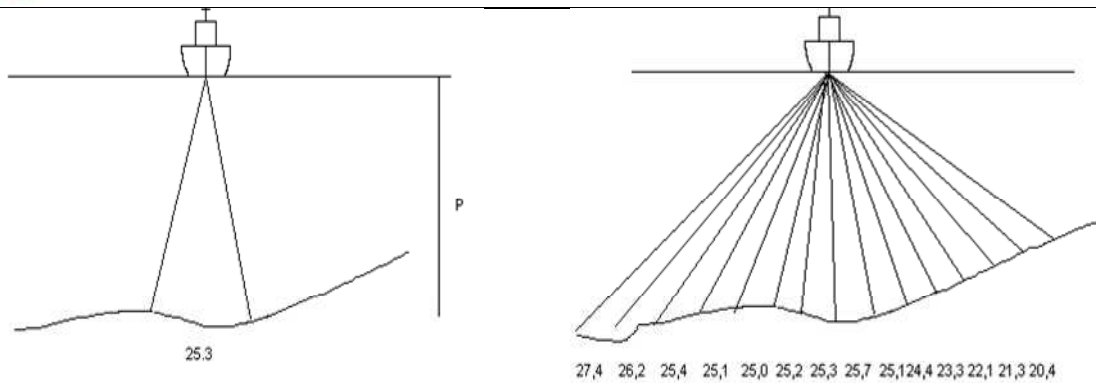


Figure 14 : Sondeur Mono-faisceau et le sondeur Multi-faisceau

a. Sondeur acoustique mono-faisceau

C'est le type de sondeur le plus couramment employé, et historiquement le premier, il mesure de la bathymétrie à l'aplomb du navire. Il a connu un essor considérable entre les deux guerres mondiales, avec le développement de l'électronique de première génération. L'enregistrement se faisait d'abord sur papier, sous forme d'échogrammes analogiques. De nos jours, toutes les données sont enregistrées au format numérique, même si une sortie sur papier thermoréactif reste possible pour certains appareils.

b. Sondeur acoustique multi-faisceau

Les sondeurs multifaisceaux (SMF) ont fait leur apparition au cours des années 1970. Ils mesurent simultanément la profondeur selon plusieurs directions, déterminées par les faisceaux de réception du système. Ces faisceaux forment une fauchée perpendiculaire à l'axe du navire. On explore ainsi le fond sur une large bande : on parle de bathymétrie surfacique et d'exploration totale.

II.2. Equipement du mono-faisceau

L'équipement du mono-faisceau qu'on utilise pour nos travaux de bathymétrie est constitué de :

- Vedette ou bien un Zodiac ;
- Transducteur (échosondeur);
- Unité centrale ou bien PC portable et Logiciel d'acquisition;
- Système de positionnement (GPS) ;
- EA400 ;

La figure 15 montre l'équipement utilisé lors un levé bathymétrique :



Figure 15 : Equipement sur Zodiac (EA400, Hémisphère, PC, GPS, Batteries)

II.2.1. Architecture du système du mono-faisceau

Le système de la bathymétrie mono-faisceau est composé : Transducteur, Centrale de Pilonnement, PC d'acquisition, système de positionnement et un écran barreur pour le pilote pour qu'il suit les profils lors de la navigation.

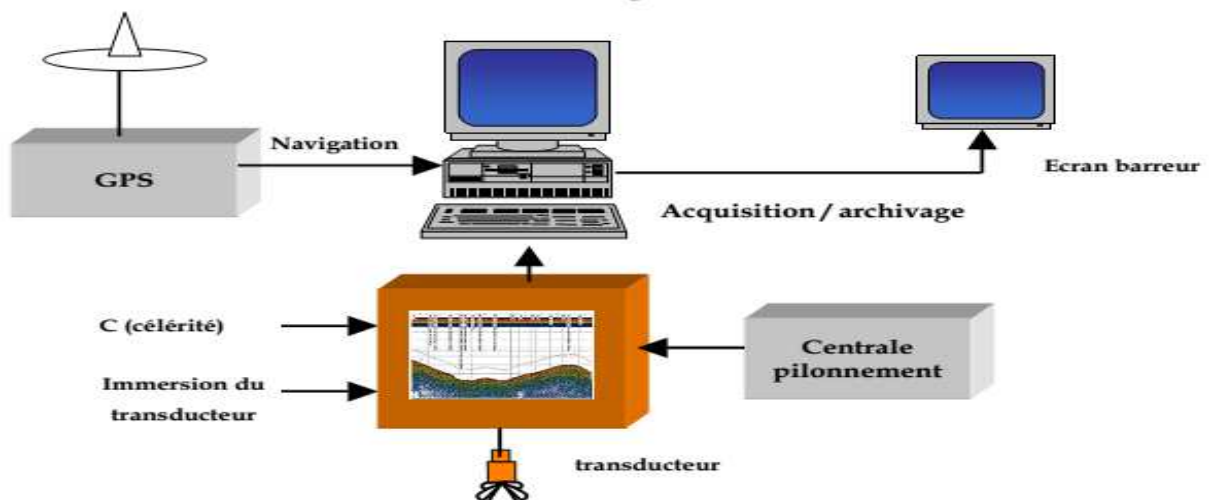


Figure 16 : Architecture du système du sondeur mono-faisceau

Le signal acoustique est émis vers le nadir par un transducteur à large ouverture (typiquement plus de 30 °) et réfléchi par le fond ; l'écho est reçu par le même transducteur. Connaissant la célérité moyenne du son, la mesure du temps de parcours permet d'accéder à la profondeur minimale entre l'émetteur/récepteur et le fond.

a) Transducteur

Le transducteur transmet le signal acoustique réfléchi en un signal électrique, puis ce dernier est transformé en une information digital dans la central de pilonnement en tenant en compte des paramètres qu'on configure dans le logiciel d'acquisition (ex : Célérité de son, Température, Salinité, Hauteur d'eau, Marée...). Le logiciel d'acquisition synchronise l'information de la bathymétrie avec celle de positionnement.

Les transducteurs sont classés principalement par leurs fréquences de leurs ondes acoustiques.

Les fréquences des ondes acoustiques employées sont différentes selon les profondeurs de la zone de lever. Plus la profondeur est grande, plus la longueur d'onde est petite

En effet, d'après Lurton [1998], l'amortissement du son dans l'eau augmente très fortement avec la fréquence. Par contre, plus la fréquence est élevée, plus la résolution spatiale du sondeur est bonne. La correspondance approximative entre fréquence et portée maximale est donnée dans la figure suivante.



Figure 17 : Transducteur

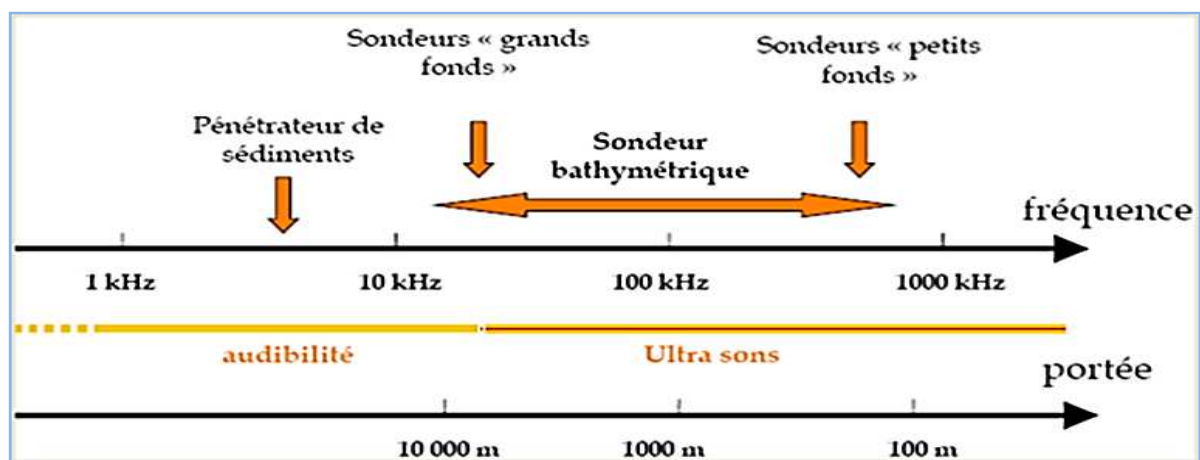


Figure 18 : Gamme de fréquences et portées approximatives

Certains sondeurs utilisent deux fréquences : une basse fréquence et une autre plus élevée, par exemple 30 et 200 kHz. L'utilisation de deux fréquences différentes a plusieurs avantages. Tout d'abord, il faut savoir qu'une onde de basse fréquence sera réfléchiée par un matériau de densité supérieure au matériau sur lequel se réfléchit une onde de fréquence plus élevée. Cela signifie donc qu'une mesure basée sur deux fréquences permet de distinguer deux couches géologiques différentes qui composent le fond. On peut ainsi déterminer l'épaisseur de vase au-dessus d'un fond sableux, pour peu que la profondeur ne soit pas trop importante. En effet, la pression de la

colonne d'eau sur le fond rend les matériaux superficiels aussi compacts que les roches sous-jacentes, et il n'y a plus de distinctions possibles, du moins avec la gamme de fréquences citée plus haut.

Par contre, Lurton [1998] décrit des sondeurs spécialement conçus pour l'exploration des premières stratessédimentaires, par l'emploi de fréquences très basses (1 à 10 kHz), mais avec un niveau d'énergie très élevé. L'utilisation de deux fréquences différentes s'avère aussi efficace en présence de plantes aquatiques, et c'est d'ailleurs l'usage principal de la basse fréquence. Dans ce cas, il est possible que la haute fréquence ne détecte que les plantes, alors que la basse fréquence permet la détection du sol, en traversant ce « couvert végétal ».

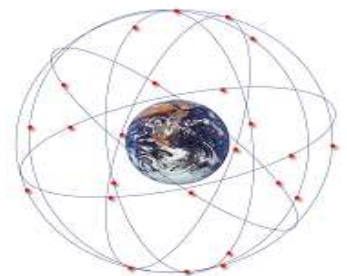
D'un autre côté, on ne sait alors pas si ce qui est détecté par le sondeur relève de la surface du sol, ou d'un changement de densité dans une couche plus profonde. Afin de déterminer ces différentes couches, des prélèvements géologiques doivent-être réaliser, en complément des mesures au sondeur.

b) Système de positionnement

Le système de positionnement a déjà révolutionné beaucoup de domaines liés à la navigation, à la localisation et au positionnement. Plusieurs disciplines de la science de la terre qui s'intéresse au positionnement profitent pleinement de cette technologie. La position d'une information est devenue parmi les principaux éléments qui la mis en valeur.

Trois services mondiaux de positionnement par satellite dominant sur le marché, à savoir :

- Global Positioning System (GPS) : dispositif militaire américain opérationnel depuis 1980;
- Global Navigation Satellite System (GLONASS) : dispositif militaire russe ;
- GALILEO : dispositif civil européen opérationnel depuis 2011.



Le système GPS comprend 3 composantes principales :

- la composante spatiale constituée de 24 satellites en orbite autour de la Terre (ces 24 satellites sont répartis sur 6 plans orbitaux inclinés de 55° par rapport à l'équateur. Ils orbitent à une altitude de 20 000 km et ont une période de révolution de 11 h 58.);
- la composante de contrôle formée de 5 stations de poursuite au sol (les stations de



poursuite ont pour principale fonction de calculer la position des satellites, information qui est par la suite transmise aux récepteurs.);

- la composante usagère qui comprend les récepteurs mobiles.



Figure 19 : Hémisphères (ou bien antennes) du système de positionnement

Avec le système GPS, la position tridimensionnelle (latitude, longitude et altitude) d'un utilisateur peut être calculée, de manière continue et instantanée, en tout endroit sur Terre.

Lorsqu'un récepteur GPS est mobile, sa vitesse et la direction de son mouvement peuvent être également déterminées. De plus, le système GPS fournit de l'information temporelle, c'est-à-dire qu'un utilisateur peut associer un indicateur de temps à toutes les informations qui sont recueillies ou à tous les événements qui se produisent lors de levés de terrain.

On distingue deux modes d'observation par GPS :

- absolu qui consiste en un positionnement par GPS mobile en un seul récepteur ;
- et le mode différentiel (ou bien relatif) qui consiste à l'utilisation d'une base en un point connu avec l'observation par le mobile.

III. Logiciel d'acquisition et logiciel de traitement

Les logiciels d'acquisition qu'on utilise est Hypack c'est la version évoluée de Navi-PAC: nous permet d'enregistrer les valeurs de la bathymétrie avec leurs positions XY (Z), destinée à tous les travaux d'investigation des domaines aquatiques, il permet à la fois l'acquisition et le traitement des données.

*Chapitre V : Calcul de Volume d'eau du barrage
ARICHA*

I. Partie terrain : Levé topographique et bathymétrie de la zone d'étude

1. Equipement et montage de la conduite

A. Topographie

On désigne sous le nom général topographie l'art de représenter sur une feuille plane de papier une portion déterminée de la surface du sol terrestre avec tous les détails, naturels ou artificiels, qui s'y rencontrent et de donner en même temps une représentation expressive rigoureuse de son « relief ».

Autrement dit, la topographie doit avoir un but de construire, sur une feuille de papier, un figure qui soit la reproduction de l'apparence qu'aurait la portion du sol retracée, si cette portion était vue d'une très grande distance verticale : d'un aéroplane par exemple.

Il en résulte qu'une carte topographique doit être un dessin ou toutes les lignes qui se trouvent sur le sol figureront, en se rencontrant sous les mêmes angles que dans la nature, et en ayant toutes leurs longueurs réduites dans la même proportion.

Une carte topographique est donc une figure géométriquement semblable à la portion du sol qu'elle représente.

A-1. Levé topographique

En topographie, un lever (ou levé) a pour objectif de récolter des données existantes sur le terrain (coordonnées x y z) en vue de leur transcription à l'échelle sur un plan ou sur une carte. Il est destiné à définir la localisation exacte des principales caractéristiques physiques du terrain (lacs, routes, forêts, formations rocheuses, etc.) ou encore des divers éléments d'une ferme piscicole (étangs, barrages, digues, canaux de drainage, sources d'alimentation en eau), ainsi que le relief vertical d'une zone ou ferme choisie; les résultats du levé topographique devrait permettre la préparation de plans et cartes topographiques.

L'ensemble des informations obtenues, (ensembles des points), nous investir a réalisé des plans côté....

Il existe différents modes d'acquisition de ces données.

- Soit les opérations sont menées conjointement avec deux appareils de mesure différents (X, Y et Z).
- Soit les opérations de lever sont réalisées à l'aide d'un seul appareil de mesure (X, Y, Z) : elle consiste à mettre un appareil de mesure sur un point de station choisi.

A-2 Levé RTK

Dans notre étude on 'a utilisé le levé Cinématique temps réel ou (RTK, *Real Time Kinematic*), qu'est définie comme une technique de positionnement par satellite basée sur l'utilisation de mesures de phase des ondes porteuses des signaux émis par le système GPS. Une station de référence fournit des corrections en temps réel permettant d'atteindre une précision de l'ordre du centimètre.

En pratique, les systèmes RTK utilisent un récepteur fixe (station de base dont la position est connue précisément) et un certain nombre de récepteurs mobiles. La station de base compare la position calculée à partir du signal GPS et la position réelle, puis réémet les corrections à apporter vers les récepteurs mobiles. Cela permet aux unités mobiles de calculer leur position relative avec une précision de quelques millimètres, bien que leur position absolue soit aussi précise que la position de la station de base. La précision nominale typique pour ces systèmes est de 1 cm horizontalement et 2 cm verticalement.

- Les levés cinématiques en temps réel utilisent une radio pour transmettre des signaux de la station de base au mobile. Puis le mobile calcule sa position en temps réel. Configurez ce type de levé lors de la création ou l'édition d'un Type de levé, puis suivez les étapes suivantes pour effectuer un levé RTK:



Figure 20 : Installation du GPS, Base fixe

a) Configurer le type de levé

Pour ce faire:

- Dans le menu principal, sélectionnez Configuration / Types de levés / RTK.
- Sélectionnez chacune des options à tour, et configurez-les selon votre équipement et vos préférences de levé.
- Lorsque vous avez configuré tous les paramètres, appuyez sur Stocker pour les enregistrer.

b) Configurer le récepteur de base

Pour ce faire:

- Installez la station de base et connectez le carnet de terrain.
- Dans le menu principal, sélectionnez Levé / RTK / Démarrer récepteur de base. Si vous utilisez ce Type de levé pour la première fois, l'assistant Type vous demande de spécifier le type d'équipement utilisé.

c) Configurer le récepteur mobile

Pour ce faire:

- Installez le Récepteur mobile et connectez le carnet de terrain.
- Dans le menu principal, sélectionnez Levé / RTK / Commencer levé. Encore ici, il se peut que l'assistant Type vous demande de spécifier le type d'équipement utilisé.

- Initialisez le levé. Si vous avez sélectionné l'option En vol (OTF), l'initialisation se fait automatiquement. Autrement, l'écran Initialisation s'affiche.
- Lorsque le mobile est initialisé, le mode de levé dans la ligne d'état apparaît comme RTK: Fixe. Vous pouvez alors mesurer les points.

d) Commencer le levé.

Pour ce faire:

- Dans le menu principal de le récepteur mobile, sélectionnez Levé / Mesurer points.
- Entrez le nom du point et le code si ces derniers ne s'affiche pas automatiquement
- Dans le champ Type, sélectionnez Point Topo.
- Entrez la hauteur d'antenne.
- Appuyez sur le bouton Mesurer. L'antenne doit rester immobile et vertical pendant que vous mesurez un point.
- Appuyez sur le bouton Stocker pour stocker le point.
- Déplacez-vous au point suivant et mesurez-le.
- Pour revoir les points stockés, sélectionnez Revoir étude courante dans le menu Fichiers.

e) Terminer le levé.

Pour ce faire:

- Dans le menu principal, sélectionnez Levé / Conventionnel / Fin du levé.
- Appuyez sur Oui pour confirmer.
- Eteignez le carnet de terrain.

Finalement On obtient un Fichier portant : les coordonnées (X, Y et Z).

B. Levé Bathymétrique

Afin de réaliser les travaux de bathymétrie un équipement de navigation, à ces fins un zodiac est nécessaire lorsqu' on recourt aux méthodes artisanales. Lors de la réalisation des levés bathymétriques le zodiac doit être équipé d'un ordinateur portable, échosondeur, moteurs, EA400, Hémisphère et un GPS. (Fig.15).

En principe, un inventaire bathymétrique peut se dérouler à n'importe quel moment pendant la période sans glace. Cependant, la prolifération de la végétation aquatique peut interférer avec la précision des mesures de profondeur. C'est notamment le cas pour les lacs fortement eutrophiques.

Avant de commencer le lever sur le terrain, il est important de bien définir la trajectoire à adopter pendant le lever. La réalisation des profils en long (axe du barrage) et des profils en travers avec un espacement de 15m entre deux profils le long du barrage et d'un espacement de 10 m au niveau de la digue, sont primordiales pour le logiciel de navigation et d'acquisition (EA400, Hypack). Après montage des appareils et équipements dans le zodiac on prend soin de positionner l'antenne GPS à proximité de la sonde.

Malgré les contraintes du vent et végétation au niveau du barrage, lors de la navigation sur zodiac il faut essayer de suivre le sens des profils déjà réalisés, après traitement des ondes reçus par l'échosondeur, le logiciel Hypack permet l'obtention des profils bathymétriques.

a) GPS

Un GPS est nécessaire pour la réalisation de la bathymétrie d'une zone d'étude, il directement influencer la qualité et la quantité de données à capter. Par exemple, un GPS portable, couramment vendu dans les boutiques de plein air, offre des précisions variant entre deux et dix mètres, tandis que des stations GPS de meilleure qualité offrent des précisions inférieures au mètre.

b) Echosondeur

Un échosondeur comprend deux parties principales:

- un boîtier de commande qui contient un circuit électronique; celui-ci engendre une énergie électrique de haute fréquence.
- un élément électro-acoustique en forme de sabot (appelé transducteur) qui joue le rôle de convertisseur d'énergie électrique en onde acoustique et vice-versa; il est relié au boîtier de commande par un câble.

La sonde est la partie la plus importante du sondeur car elle émet et reçoit le signal émis par l'ampli du sondeur. Concernant les sondes bathymétriques, les plus courantes offrent des précisions de l'ordre de 80 centimètres, tandis que des sondes beaucoup plus coûteuses pourront offrir des précisions voisines du millimètre.

Le transducteur est évidemment immergé de 30 à 40 cm sous la surface. Il doit être fixé sur la proue du bateau, aussi loin que possible du moteur pour limiter les vibrations parasites.

« L'appareil mesure le temps qui s'est écoulé entre l'émission d'une impulsion et le retour de son écho, après réflexion sur le fond de la rivière ».

C. Configuration des logiciels

a) EA400

L'échosondeur mono faisceau utilisé lors de la campagne bathymétrique est équipé d'un programme qui permet la conversion des ondes acoustique en signal électrique.

EA400 Schéma fonctionnel simplifié

Entrée des sondes

Des sondes externes pour la zone 1 par la zone 4 peuvent être de n'importe quel type tel que décrit ci-dessous. Chaque zone est ensuite programmée selon le type de sonde utilisé.

- Sonde de température
- Sonde d'humidité
- Sonde d'eau

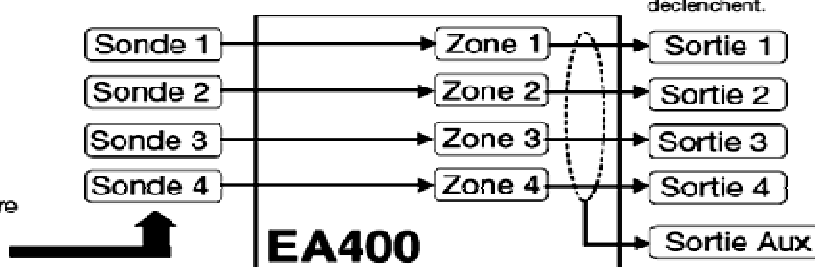


Figure 21 : EA400 Schéma de fonctionnement

b) HYPACK

Le logiciel hydrographique HYPACK, développé par COASTAL Océanographiques, permet la réalisation et le traitement de levés bathymétriques.

HYPACK permet de préparer la mission, d'effectuer l'acquisition des données, le traitement des sondes, et même de réaliser des plans et cartes dignes de véritables cartes marines.

À partir de HYPACK, on procède dans un premier temps à l'intégration du niveau du plan d'eau (horizontal ou avec une pente) afin de transformer les levés de profondeur en cotes IGN.

Pour le lever, nous utilisons le logiciel Hypack, qui permet de collecter et de synchroniser les données provenant de l'échosondeurs et du système de positionnement. Ce logiciel tourne sur un PC sous Windows (XP dans notre cas).

Le programme échosondeur display permet de configurer et visualiser un graphique de profondeur de sondage en temps réel pendant les relevés.

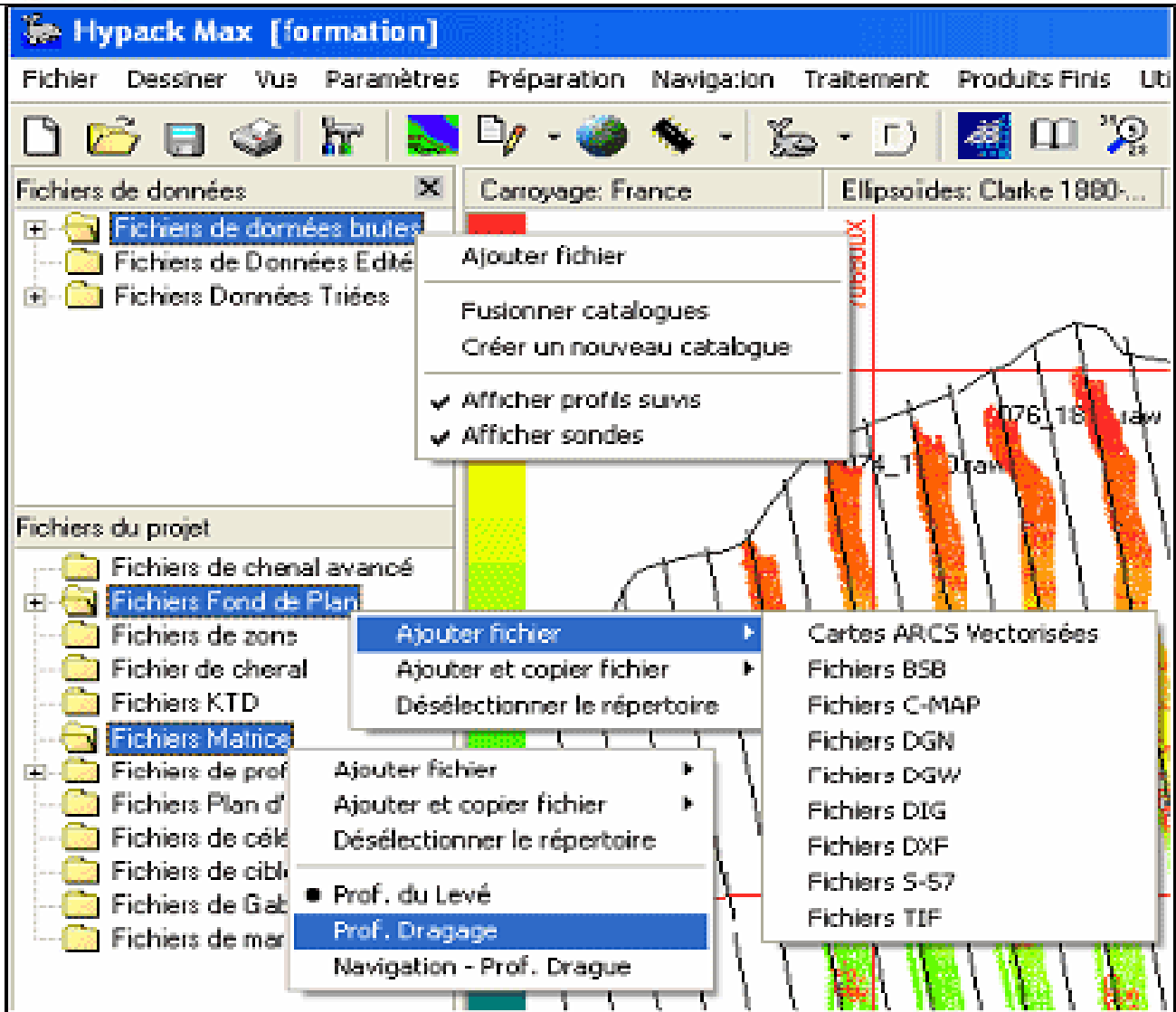


Figure 22: Interface de l'HYPACK

c) Contrôle de la qualité des données bathymétriques

Après installation du matériel on mesure le « draught » c'est la profondeur entre le niveau bas de le transducteur et le niveau d'eau après avoir immergé ce dernier dans l'eau. On fait entrer cette valeur du « draught » au niveau de l'échosondeur pour corriger la lecture lors de la réalisation des levés.

Parallèlement on mesure aussi la valeur du vertical du GPS pour l'utiliser au niveau du logiciel de navigation Hypack, pour la correction de la profondeur.

On prend aussi lors du traitement des données brutes issues, le niveau de l'eau et ce en contrôlant l'échelle de marée pendant l'élévation bathymétrique.



Figure 23: Contrôle de l'échelle de marrée

Après vérification et saisie du « draught », verticale du GPS et l'échelle de marrée dans les programmes, on procède par la suite au contrôle de qualité de la vitesse de propagation des ondes dans l'eau est réalisé par la mesure de la profondeur et ce par une barre d'étalonnage qu'on fait descendre au-dessous du transducteur d'un mètre et on vérifie la profondeur affichée par l'échosondeur, à chaque fois on la fait immergé d'un mètre de plus jusqu'à arriver à 10 mètres de profondeur.

d) Levés et profils bathymétrique

Après la préparation des équipements de travail sur le zodiac on commence la navigation en prenant en considération les profils déjà réalisés dans la phase précédente c'est-à-dire en essayant de ne pas dévier au profil, tout en vérifiant la barre « left right indicateur » sur l'interface du logiciel Hypack la figure 24 ci-dessous.

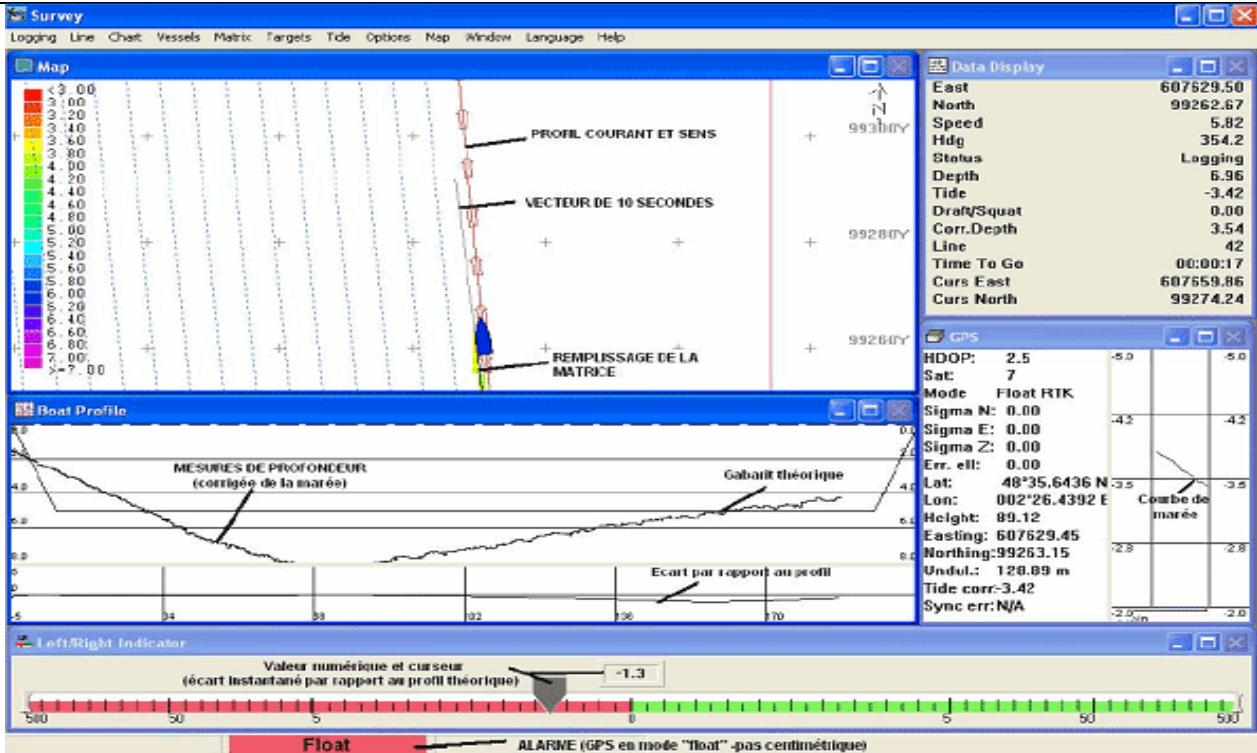


Figure 24 : Interface du logiciel Hypack lors du levé bathymétrique des profils

On réalise des profils en travers et un profil de l'axe le long du plan d'eau, les zones couvertes de végétation et où la profondeur d'eau est faible ne sont pas concernées en vue de protéger le moteur du zodiac et le sabot de l'échosondeur.

La figure 25 ci-dessous illustre le résultat final du levé bathymétrique prêt à traiter et analyser ultérieurement dans la phase bureau.

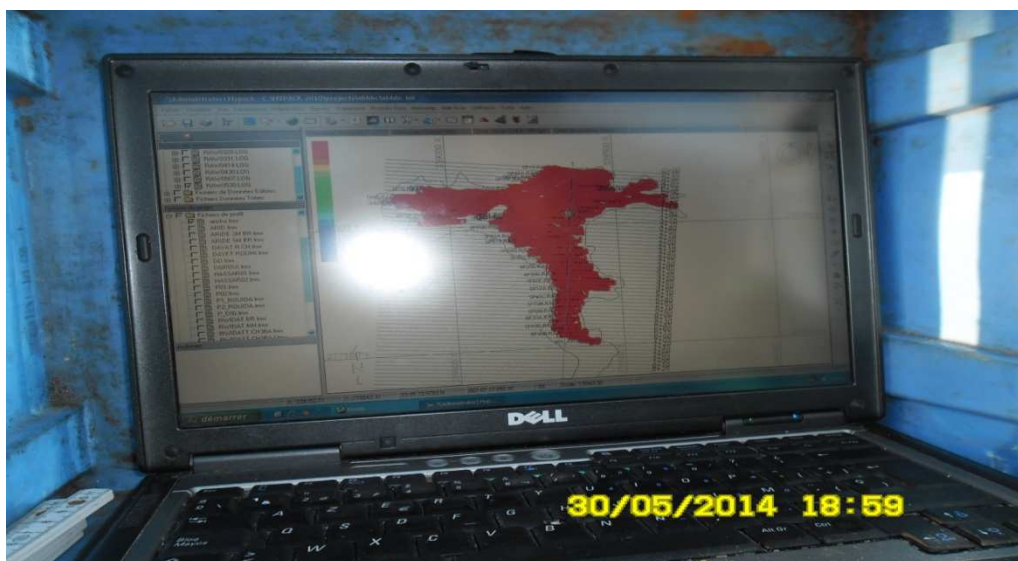


Figure 25 : Levé des profils bathymétriques et topographiques

II. Partie bureau : traitement et modélisation

1.1. Traitement des données : Hypack

Ce logiciel permet, outre l'intégration des différentes données et la planification des levés, de faire différents traitements sur ces données, afin d'éliminer les artefacts, les mesures aberrantes ou d'intégrer différents paramètres extérieurs.

Lors du levé, pour diverses raisons, certaines profondeurs mesurées par le sondeur sont aberrantes, et leur élimination est indispensable. Ces artefacts sont facilement repérables, de par leur différence souvent très nette avec leurs points voisins.

Le traitement des données mono-faisceau se fait par le logiciel Hypack qui autorise d'éliminer des points qui dépassent le niveau de la plus haute eaux, incohérentes aux profils réalisés qui peuvent être dues à une mauvaise digitalisation, le vent lors du levé, la pression et température qui peuvent influencer la vitesse de propagation de l'onde ,des erreurs de détection du fond au moment où l'onde acoustique se réfléchit sur un obstacle, que l'on suppose être le fond par contre, si le fond est recouvert de vase, ou de plantes aquatiques de faible hauteur, il est très difficile, voire impossible de faire la différence entre les points situés sur le dessus de ces plantes et les points qui sont réellement sur le fond. Également le logiciel permet la correction de la marée.

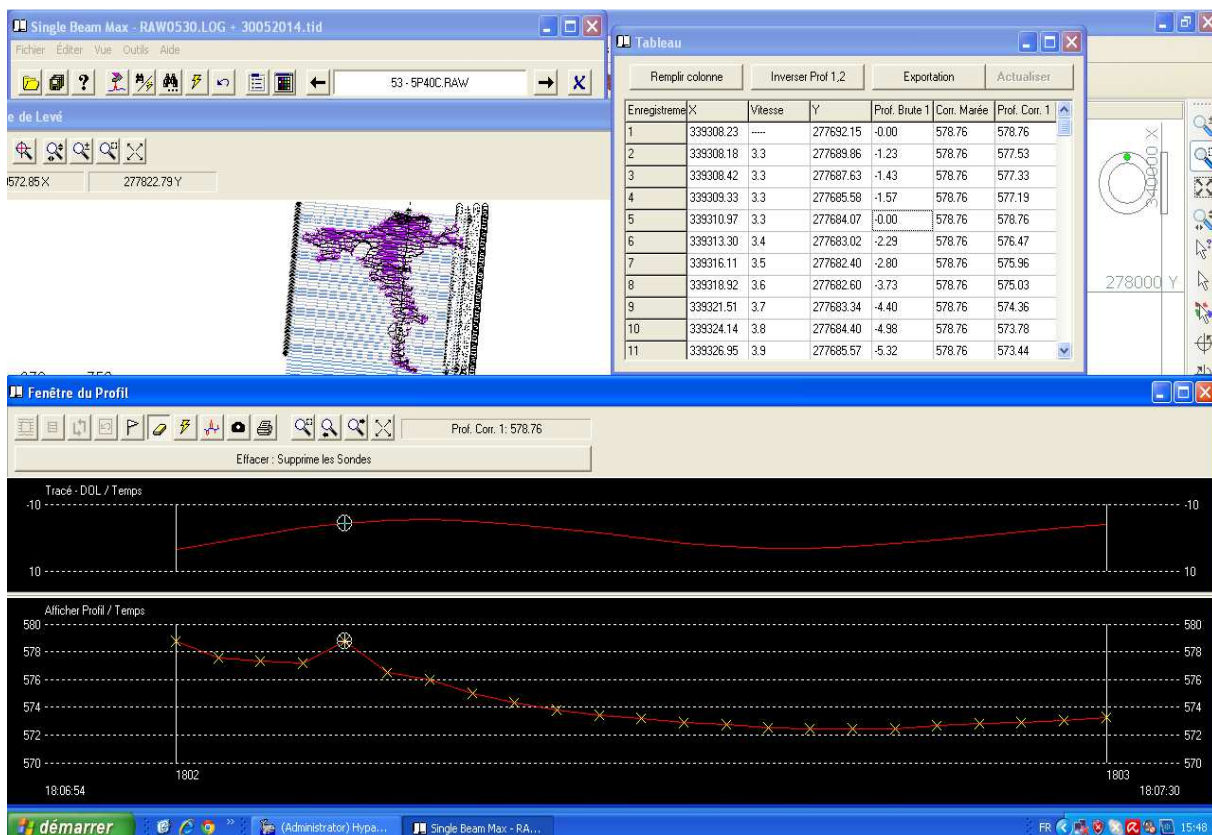


Figure 26 : Interface de l'Hypack lors du traitement des données (suppression des points qui dépassent le niveau de plus hautes eaux)

Après traitement on obtient des données brutes sous forme de fichier (X,Y,Z) Voir Fig.27, qu'on doit exploiter sur un logiciel de modélisation (surfer) afin de réaliser une interpolation des points pour avoir un modèle du fond du barrage.

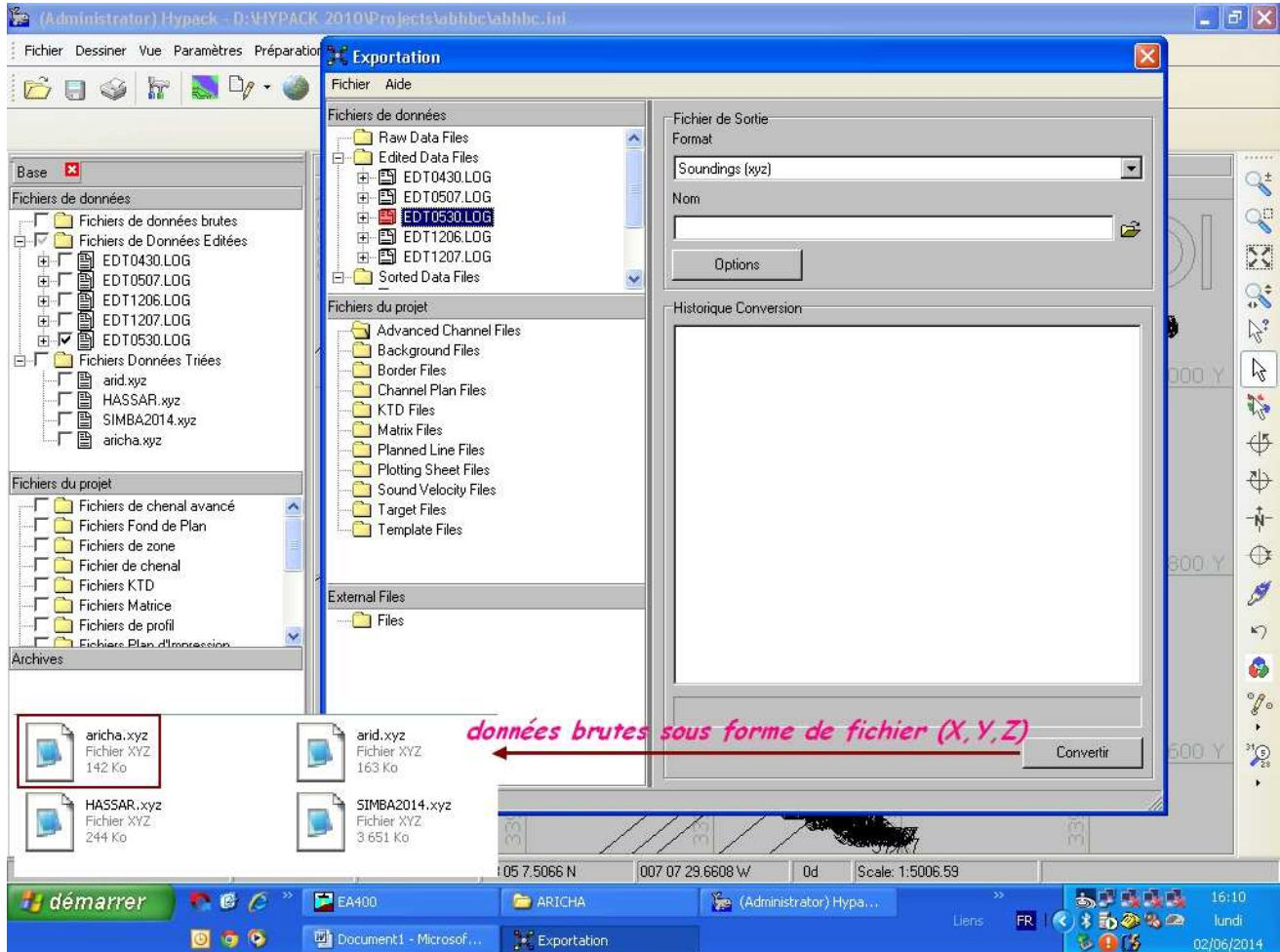


Figure 27 : Interface de logiciel Hypack lors L'exportation de fichier « ARICHA. X Y etZ »

1.2. Modélisation des données brutes: surfer.

1.2.1. Présentation du logiciel Surfer.

Le logiciel Surfer 10, conçu par Golden Software, vous permet de réaliser des modèles numériques de terrain (MNT) issus des données que vous aurez récoltées sur le terrain via les études topographiques et bathymétriques. Le principe de Surfer est le suivant : le logiciel vous permet de créer des grilles qui vont interpoler les données irrégulières de vos points x, y, z afin de les ordonnées.

C'est à partir de ces grilles que l'on pourra créer plusieurs types de cartes : base Map, contour Map, 3D surface, vector et bien d'autre.

Le logiciel surfer permet aussi de : créer une grille X, Y, Z, mettre en forme des cartes, réaliser des calculs de volume, d'envasement des barrages, longueurs et surfaces.

1.2.2. Interpolation par krigeage

Le logiciel surfer permet l'utilisation de douze méthodes d'interpolation choisi pour divers besoins, pour notre cas le cas d'étude bathymétrique du barrage Aricha on 'a choisi la méthode d'interpolation par « krigeage » qui s'avère la plus adéquat pour une variété de raisons.

La méthode « Krigeage » (Kriging) est une méthode de grille géostatistique très utilisée dans différents domaines (géophysique, géologie, traitement d'images...).

Le « Krigeage » utilise des variogrammes : courbes donnant le poids à affecter aux points de données en fonction de leurs distances par rapport au point à interpoler. Cette méthode permet donc de respecter le type de topographie de la zone à étudier.

De plus les variogrammes pouvant être différents suivant les directions, il est possible d'introduire un caractère d'anisotropie à la surface à modéliser.

La méthode fonctionne par itérations successives afin de minimiser les erreurs d'interpolation.

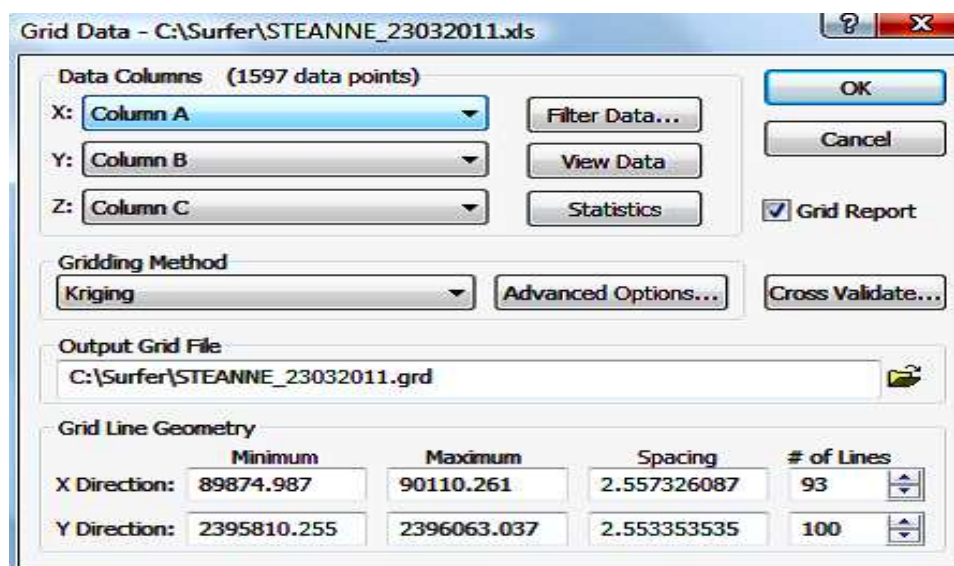


Figure 28: Interface du Surfer lors du création du Grid d'interpolation

Etapas d'interpolation :

- Création du fichier Grid
- Choix de la méthode d'interpolation
- Déterminer le rayon de recherche maximum et nombre de secteur de recherche
- Définir les coordonnées X, Y maximum et minimum du Grid

L'interpolation du plan coté initiale du barrage Aricha permet l'obtention d'une carte qui modélise le fond du barrage c'est à dire la profondeur à chaque point du barrage de façon à pouvoir l'exploiter pour le calculer la capacité de la retenue du barrage.

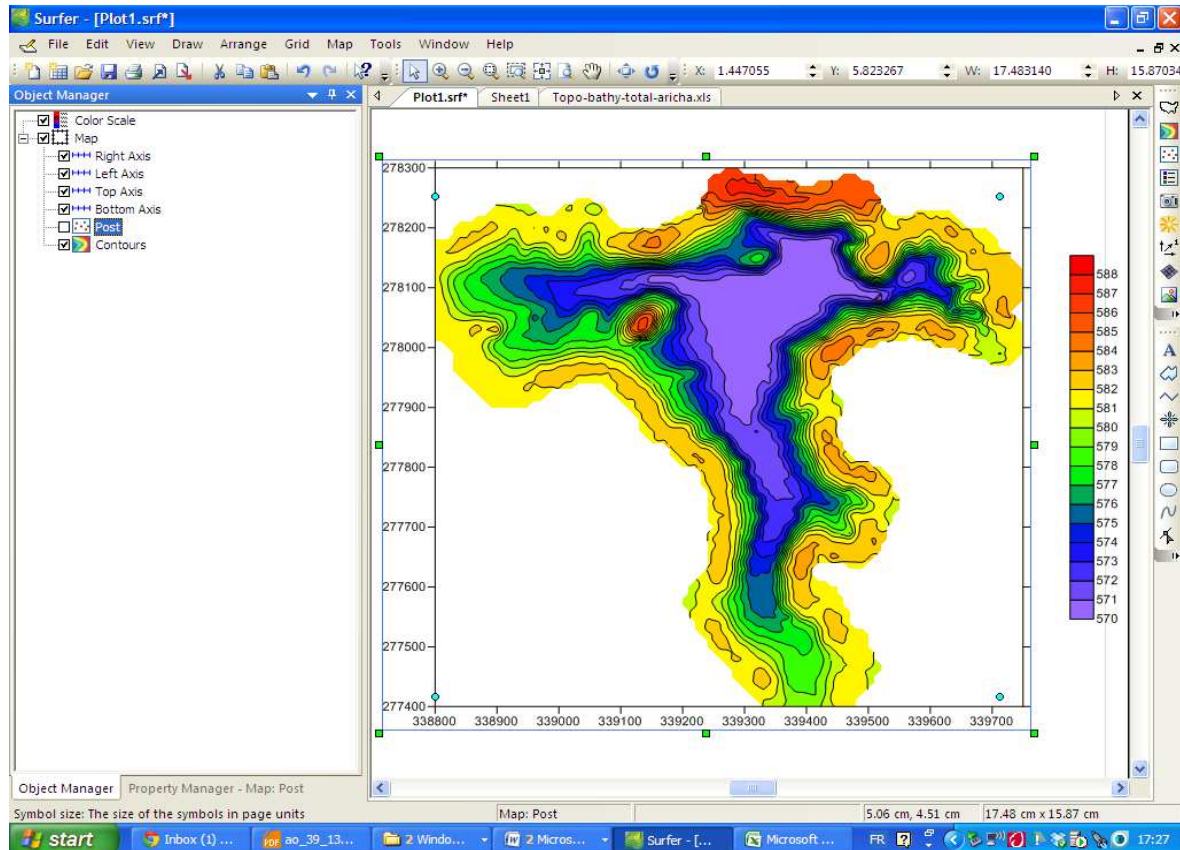


Figure 29 : Résultat de l'interpolation du plan coté initiale du barrage ARICHA considéré dans ce travail.

La carte de retenue permet le suivi de la capacité fonctionnelle qui consiste à la détermination des variations des mesures physiques du réservoir taille du barrage, variations des surfaces et hauteur du plan d'eau, volume en fonction du niveau atteint par le plan d'eau.

1.2.2. Interpolation des données topographiques et bathymétriques du barrage ARICHA

La phase d'acquisition de terrain permet ainsi d'obtenir des points géo référencés qui seront la base pour le post-traitement : interpolation des données et extraction des informations bathymétriques.

L'interpolation est utilisée afin de généraliser les valeurs des profondeurs sur l'ensemble du plan d'eau de façon à prédire les valeurs d'une variable en un point non échantillonné, à partir de points d'échantillonnages.

Rappel : L'interpolation des données a été effectuée avec la méthode de « krigage » adaptative prenant en compte l'isotropie locale des données. Se basent sur le principe que les valeurs des points proches spatialement ont des similarités plus importantes que les points éloignés.

Lors de la campagne bathymétrique la végétation au niveau du barrage a empêché la réalisation des levés à proximité des berges et ou la profondeur d'eau ne dépasse pas 1 m.

Pour ces aires des données fictives doivent être reconstruites pour éviter les trous de données quant à la réalisation de l'interpolation. Cette reconstruction des données permet d'obtenir des bathymétries complètes.

Il est possible d'extraire de nouvelles informations sur les caractéristiques du barrage morphologie et profondeurs d'eaux à chaque point du barrage. Ces informations sont fondamentales pour la compréhension du fonctionnement des plans d'eau.

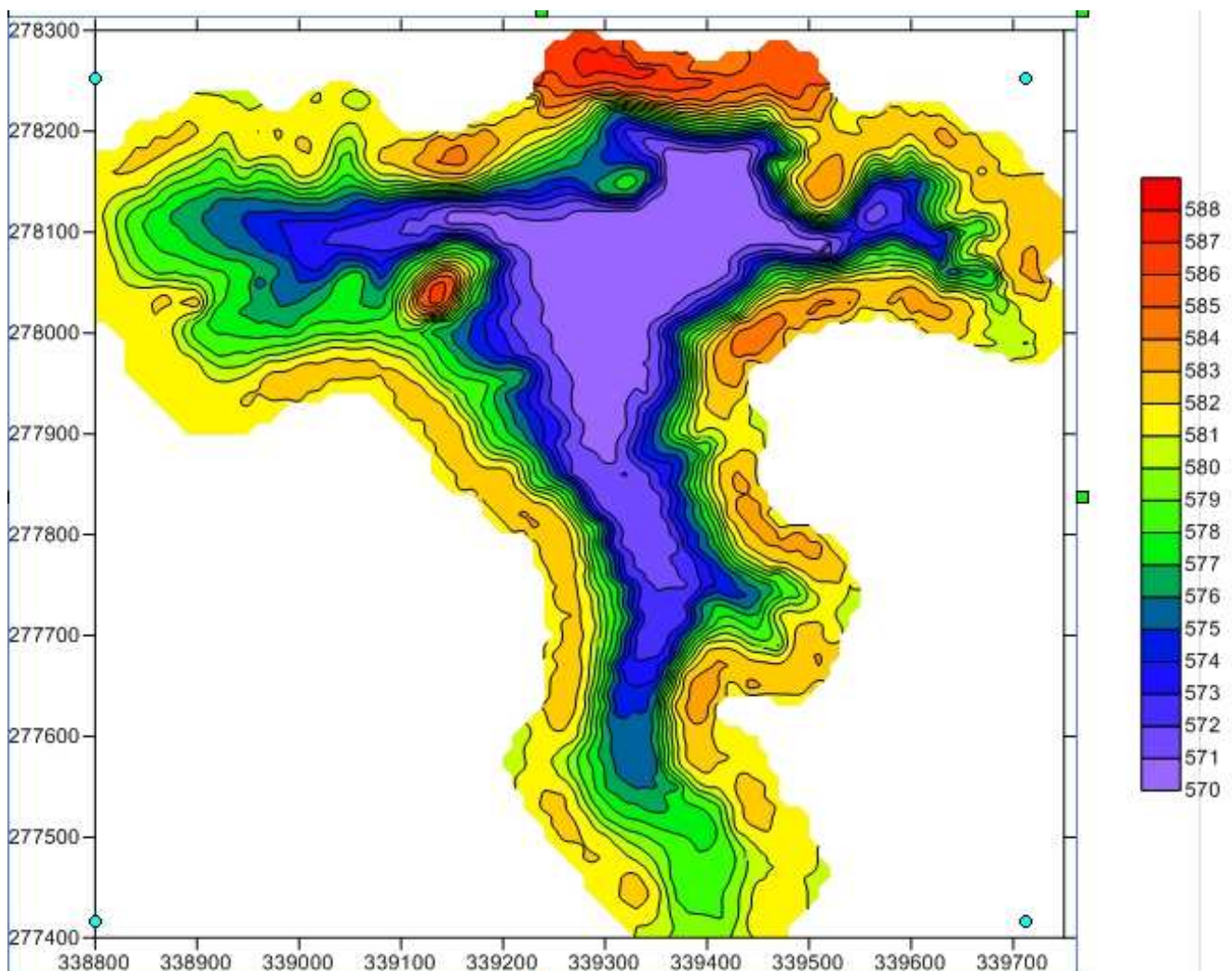


Figure 30: Résultat de l'interpolation des données bathymétriques et topographique du barrage ARICHA : carte de contour des profondeurs de la retenue du barrage.

III. Conclusion

L'étude bathymétrique a été réalisée au niveau de tout le barrage, le calcul du volume se fait au moyen du logiciel Surfer qui donne un rapport détaillé des volumes, on distingue deux volumes :

- Volume d'eau de la retenue, en se basant sur les levés topo-bathymétriques.
- Volume vide ou bien le volume obtenant à partir de l'interpolation des levées topographiques des plus haut eaux et la limite de niveau d'eau existant (actuelle).

Le tableau 6 et la figure 31, ci-dessous présentent les volumes calculés du barrage Aricha :

Tableau 6 : Données des surfaces, volumes et les côtes des différents niveaux d'eau (Bureau d'étude Hydrogeo, 2014).

	Côte (NGM)	Surface (m ²)	Volume m ³
Niveau 0	570	0	0
Niveau initiale	571	37074,11	11424,0782
Niveau d'eau	579	195467,77	882738,93
Niveau des hautes eaux	582	326613,48	1612038,9



Figure 31 : Image satellite montre les différents niveaux d'eau du barrage Aricha (Google Earth)

NB : Volume de la cuvette en retenue Normale est estimé de : 1.8 Mm^3 d'après bureau d'étude Equiter (ARCHIVES-#17560-v1 -BARRAGE_OUED_ARICHA, 12-Avril-1988)

Chapitre VI : Taux D'envasement

I. Définition

L'envasement est défini comme étant le dépôt de sédiments dans les retenues et barrages, réduisant ainsi leurs capacités de stockage.

La construction d'un barrage change les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement et la capacité de transport des sédiments (Chow V.T., 1964), transportée par l'écoulement, la matière solide tend à se déposer à l'approche des plans d'eau, car en réduisant sa vitesse, l'écoulement perd petit à petit sa capacité de transport quand le cour d'eau s'approche et se jette dans le lac du réservoir, les grossières se déposent en premier ensuite les plus fines jusqu'à atteindre la digue, n'ayant pas où s'échapper le dépôt se tasse et se consolide en réduisant ainsi la capacité de stockage du réservoir, sachant qu'en moyenne 90% des sédiments transportés par le cour d'eau sont piégés (Chow V.T., 1964).

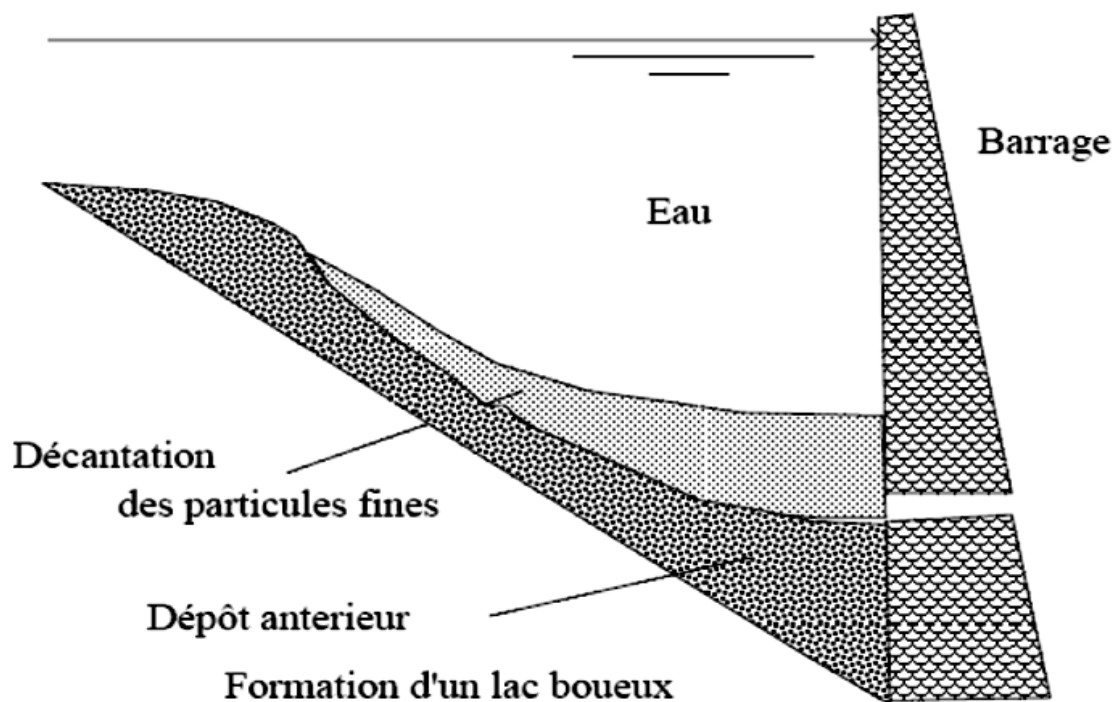


Figure 32 : Profil théorique montrant le dépôt de vase dans la retenue d'un ouvrage hydraulique (d'après Remini B, 2003)

1. Problématique de l'envasement

Dans de nombreux pays du monde, le transport de sédiments dans les réseaux hydrographiques des bassins versants et leurs dépôts dans les retenues pose aux exploitants de barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse, non seulement la capacité utile est progressivement réduite, mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile (Remini B., 2003).

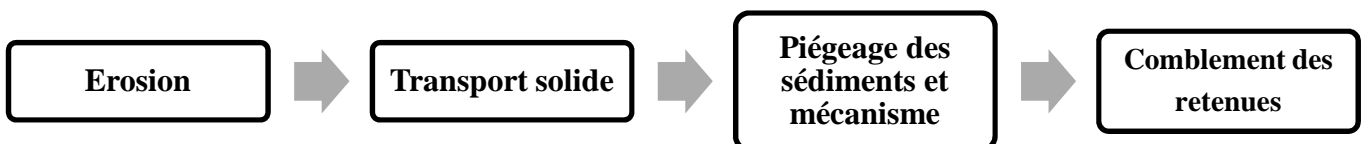
Le problème d'envasement des barrages n'est pas un problème propre au Maroc, beaucoup de pays dans le monde souffrent du problème surtout dans les zones arides et semi-arides, où le manque de ressources hydrique est accentué par l'érosion des sols qui peut atteindre les 5000 t/km²/an contre 30 à 50 t/km²/an en Europe (Abdelli M., 2007).

D'après (Fox H.R., 1997) l'envasement moyen au Maroc varie entre 0,11% à 1,6% de la capacité de stockage qui disparaît chaque année sous la vase, ce chiffre est en hausse d'après le rapport des ressources en eau au Maghreb (2009) pour atteindre 45 Hm³/an avec un volume envasé global de 1,1 Milliards de m³, ce qui représente 17% du volume total de stockage. Ces valeurs paraissent assez réduites, mais leurs conséquences économiques et aussi environnementales sont considérables, en plus des risques sur la stabilité de l'ouvrage, et le fonctionnement des équipements hydromécaniques, sachant que la densité de la vase derrière la digue peut atteindre 1,8.

2. Processus de la sédimentation

La sédimentation dans les barrages pose d'énormes problèmes au niveau du réservoir lui-même, mais aussi en amont et en aval du réservoir. Elle entraîne la réduction de la capacité utile du barrage. Le blocage des organes de vidange. La sédimentation peut mettre la stabilité de l'ouvrage en danger. Elle peut aussi accélérer l'eutrophisation du lac.

Le processus de la sédimentation est le suivant :



a) Erosion des bassins versants

L'érosion hydrique correspond à la séparation entre la particule et son support, sans inclure le transport et la sédimentation, même s'il se produit toujours un micro-transport.

b) Transport solide

Une fois ce matériau solide arrivé dans les cours d'eau, il sera transporté par la force du courant. Les concentrations des sédiments sont très élevées suivant les cours d'eau, et l'importance des crues. Elles varient énormément et peuvent atteindre ou même dépasser les 200 g/l.

Une proportion importante de ces sédiments est piégée annuellement dans les retenues de barrages. Par exemple, au Maroc près de 60% des 100.10⁶ tonnes de terre érodée annuellement se déposent dans les retenues de barrages.

c) Piégeage des sédiments et mécanisme de sédimentation

Une fois la crue arrivée au niveau des eaux stagnantes du réservoir, les matériaux grossiers se déposent dans la zone de remous en formant un « delta » en queue de la retenue. Les particules fines sont piégées dans la retenue et commencent à se déposer, se tasser, et à se consolider diminuant ainsi progressivement leur capacité de stockage en eau (voir la Fig.32).

II. Calcul du taux d'envasement :

Le taux d'envasement reflète directement le taux des dépôts de transport solide dans le barrage et par conséquent la réduction de la capacité de la retenue du barrage.

L'étude bathymétrique actuelle a été réalisée au niveau de tout le barrage, le calcul du taux d'envasement sera donc établi pour tout le corps du barrage.

Habituellement pour calculer le taux d'envasement d'un barrage, la présence de plan coté initial ou d'une étude bathymétrique (X, Y, Z) préexistante est obligatoire afin de pouvoir soustraire les données antécédentes des données actuelles qu'on vient de réaliser au cours de la dernière campagne du 30/05/2014.

Le calcul du taux d'envasement se fait par l'estimation du volume de la vase déposée au niveau du barrage. Le volume de la vase est directement calculé à partir de la carte d'envasement c'est-à-dire la carte de différence entre le plan coté initial et la topo-bathymétrie.

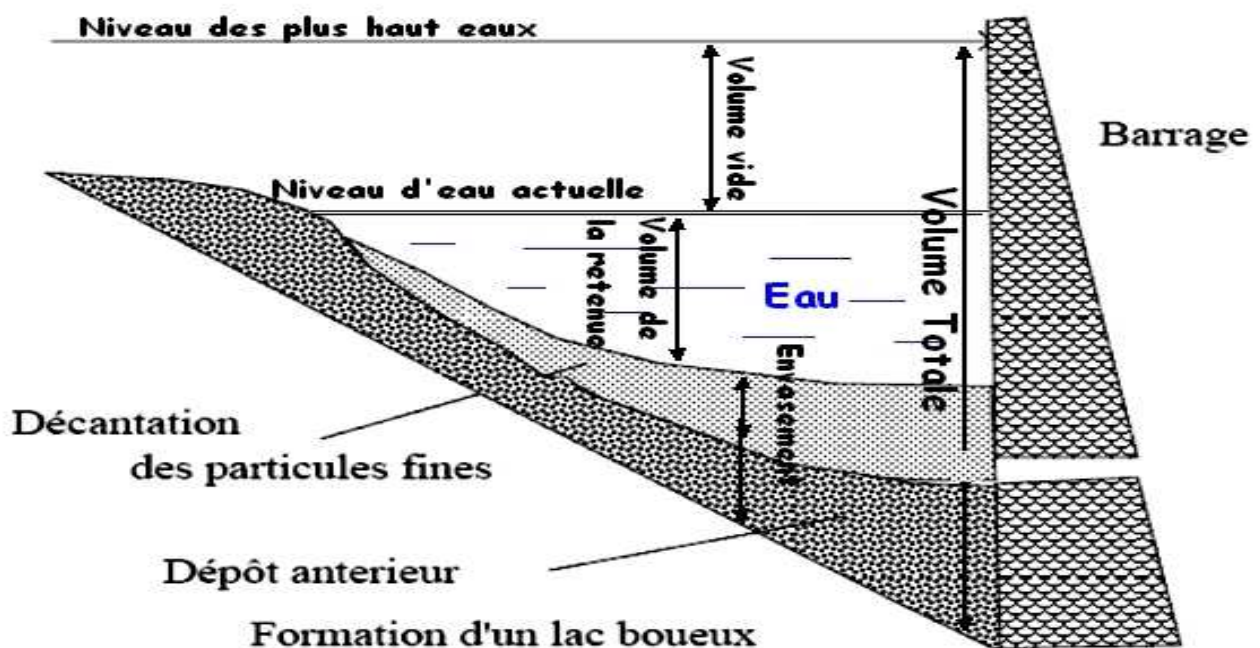


Figure 33 : Profil montrant la zonation proposée pour le barrage Aricha étudié dans ce travail. Les tranches présentées sont calculées par la méthode bathymétrique

Le calcul de taux d'envasement se fait par la formule suivante :

$$T_d = V_t - V_h$$

Avec :

$$V_h = V_v + V_r \left\{ \begin{array}{l} V_r = \text{Volume de la retenue} \\ V_v = \text{Volume vide} \end{array} \right.$$

V_t = Volume totale (capacité du barrage en m^3).

T_d = Taux d'envasement (m^3).

V_h = Volume totale (capacité) du barrage calculé (30/05/2014 en m^3).

On 'a :

	Côte (NGM)	Volume m^3
Niveau des hautes eaux calculé (V_h)	582	1612038,9
Capacité du barrage d'après Equiter 1988	582	1800000.0

NB : Volume de la cuvette en retenue Normale (Capacité du barrage) est estimé de :
1.8Mm³ d'après bureau d'étude Equiter (ARCHIVES-#17560-v1 -
BARRAGE_OUED_ARICHA, 12-Avril-1988)

Donc :

$$T_d = 1800000 - 1612038.9$$

Le Taux d'envasement calculé pendant 26 ans (1988 jusqu'à 2014) est de :

$$187961,1 m^3$$

Finalement Le Taux d'envasement est de :

$$7229.27 m^3/\text{an}$$

$$0.44\%$$

Par conséquent la durée de vie de barrage sera : 222 ans

Conclusion générale

L'étude entreprise dans le cadre de mon stage de fin d'étude faite selon une optique à la fois Topographique, bathymétrique, hydrologique, géologique et hydrogéologique. Effectué au sein du bureau d'étude Hydrogeo.

Notre barrage d'étude est situé au Nord- est de la ville de Ben Ahmed. La démarche suivie pour la réalisation de cette affaire faite pendant trois Phases successives ; Etude préliminaire, Phase terrain et un phase Bureau.

L'étude hydrologique a principalement porté sur l'étude des caractéristiques physiques du bassin versant de l'oued Aricha. Le périmètre, la surface, l'indice de compacité, le temps de concentration, la vitesse de ruissellement et le coefficient d'allongement... sont calculés. Leurs valeurs ont été appréciées, confrontés et interprétées. L'ensemble de ces paramètres donnent une forte influence sur la répartition spatio-temporelle des précipitations et des débits au sein de bassin versant étudié.

L'étude bathymétrique a été réalisée au niveau de tout le barrage. Le calcul du volume de la retenue d'eau a été effectué au moyen du logiciel Surfer qui donne un rapport détaillé de deux volumes:

- Le volume d'eau de la retenue (partie mouillée), en se basent sur les levés bathymétriques qu'est d'ordre de **882 738,93 m³**.
- Le volume vide (volume de la partie non mouillée) est un volume obtenu à partir de l'interpolation des levées topographiques des plus hautes eaux et la limite de niveau d'eau existant (actuelle) se qui donne un volume de **729 299,97 m³**.

Le taux d'envasement du barrage Aricha a été calculé pour les dernières 26 ans (1988 - 2014). Ce taux a été évalué à 187961,1 m³. Cette valeur, divisée sur la période considérée, permet de faire ressortir le taux d'envasement annuel qui est de l'ordre de 7229.27 m³/an.

Il est par ailleurs possible de déduire, à partir de ces valeurs, la durée de vie de l'ouvrage hydraulique d'Aricha faisant objet à cette étude. La durée calculée dans ce travail est de l'ordre de 222 ans, durée fortement acceptable pour ce type d'ouvrage d'art. Il est toutefois recommander de mener une étude sur les phénomènes de glissement de terrain dans le pourtour de la retenue du barrage où l'examen des images satellites révèle des zones qui sont le siège de ce phénomène naturel qui tend à réduire la durée de vie du barrage étudié.

Références bibliographiques :

- **BOUABDELLI, M. (1989)** : Tectonique et sédimentation dans un bassin orogénique: le sillon d'Azrou-Khénifra (Est du massif Hercynien central du Maroc). Thèse ès Sciences, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 262 pp.
- **Feuille** de Ben Ahmed au 1/5000 (Editions du Service Géologique du Maroc Notes et Mémoires N°137 (1959) d'après .J.Marçais).
- **TAHIRI A. (1991)** - Le Maroc central septentrional : stratigraphie, sédimentologie et tectonique du Paléozoïque; un exemple de passage des zones internes aux zones externes de la chaîne hercynienne du Maroc. Thèse ès-Sciences, Univ. de Bretagne occidentale, Brest, 311 p.
- **PIQUE, A. (1979)**: Evolution structurale d'un segment de la chaîne hercynienne: la Meseta marocaine nord occidentale. *SCI. Géol. Mém*, Strasbourg, 56, 243 p.
- **CHAKIRI, S. (1991)**:*Le Paléozoïque de la région de Tsili-Tiddas (Maroc central occidental): Stratigraphie, sédimentologie et évolution structurale hercynienne.* Thèse 3ème Cycle, Univ. Mohammed V, Fac. Sci.Rabat, 227 p.
- **ZAHRAOUI, M. (1991)**:*La plate-forme carbonatée dévonienne du Maroc occidental et sa dis location hercynienne.* Thèse ès Sciences, Brest, 261 p.
- **TERMIER, H. (1936)**: Etudes géologiques sur le Maroc central et le Moyen Atlas septentrional : tome II : les terrains post-paléozoïques Tome IV: Atlas des figures et des tableaux hors-texte *Not. Mém. SnI'. Mille.' et Carte géol. Maroc.* n U 33.
- **Chow V.T., 1964**: Handbook of Applied Hydrology. Mc-Graw Hill Book Company.
- **Rapport de synthèse, 305-1192- 12a (PDAIRE)** : le plan directeur d'aménagement intègre des ressources en eau du bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia.
- **ARCHIVES :#17560-v1:BARRAGE_OUED_ARICHA**, 12-Avril-1988, d'après Equiter (Ingénieur conseil)
- **REMINI B., HALLOUCHE W. (2003)** : Les barrages du Maghreb s'ensavent. 5° symposium int. De l'eau. Cannes 23 à 27 juin.

Site Web :

- <http://www.water.gov.ma/index.cfm?gen=true&id=12>
- <http://www.abhbc.com/index.php/bassin/ressources-en-eau>

Logiciels :

- ArcGIS 10
- Surfer 10
- Hypack
- ArcView GIS 3.2
- Google Earth

ANNEXES

Ville ou centre	Demande en Mm ³ /an					
	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Grand_Casa	164.0	163.0	184.0	197.0	212.0	228.0
RABAT	48.0	51.0	56.0	60.0	65.0	70.0
SALE	30.0	37.0	41.0	46.0	49.0	53.0
TEMAKA	11.0	13.0	16.0	20.0	23.0	27.0
MOHAMMEDIA	15.0	18.0	20.0	22.0	23.0	25.0
SKHIRATE	3.0	4.0	6.0	7.0	9.0	11.0
SETTAT	7.0	7.0	8.0	8.0	9.0	10.0
Berrechid	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
Ben_Slimane	3.0	2.7	2.7	2.8	3.0	3.3
Ain El Aouda	0.6	1.0	1.3	1.6	1.9	2.2
BOUZHKA	1.6	1.5	1.7	1.9	2.0	2.2
MRIRT	0.8	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8
BEN_AHMED	1.3	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5
LBIR_JDID	0.6	0.8	0.9	1.1	1.2	1.4
DEROUA	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2
SOUALEM	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9
EL_GARA	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
ROMMANI	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6
OULMES	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
OULAD_M'RAH	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5
AGIFI MOUIS	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
MAAZIZ	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4
OULAD_HRIZ_SAEH	0.0	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
SIDI_RAHHAL_CHATAI	0.0	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4
LOULAD	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
KAHF_N'SOUR	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
MY_BOUAZZA	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
TIDDAS	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
RAS_EL_AIN	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
DOUJSSOUSSEN	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
TIGHZA	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
BOUKNADEL	0.7	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3
TOTAL ZONE D'ETUDE	294.1	312.5	353.1	385.2	417.9	455.2

Tableau 1 : Evolution de la demande en eau urbaine (hm³/an)

Provinces - Régions	2 005	2 010	2 015	2 020	2 025	2 030
Mohammedia	0.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.2
Médiouna	0.3	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4
Nouaceur	0.8	4.1	4.8	5.5	6.3	6.9
Sale	0.1	9.0	9.8	10.7	11.6	12.4
Skhirate-Temara (par Tamesnat)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Skhirate-Temara (par SMBA)	0.5	2.1	2.5	2.9	3.3	3.6
Khemisset	0.8	3.1	3.2	3.4	3.6	3.8
Settat	2.0	9.0	9.8	10.7	11.6	12.4
Benslimane	0.7	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7
Khouribga	0.6	2.0	2.1	2.2	2.4	2.5
Khenifra	0.6	1.8	2.0	2.1	2.2	2.3
El jadida	0.4	1.9	2.1	2.2	2.4	2.6
Total AEP Rural	7.4	38.5	42.3	46.1	50.3	53.8
Total Cheptel	5.7	5.7	5.6	5.6	5.5	5.3

Tableau 2 : Evaluation de la demande en eau rurale (hm³/an)

Type	Digue homogène en limons argileux avec épaulements en enrochements et cailloux	
Côte crête	584.00 NGM	
Hauteur Maximum sur fondation	30 m	
Longueur en crête	195 m	
largeur en crête	8 m	
Pente des talus	Amont	3H/1V
	Aval	2.5 h/1 v avec risberme de 8 m à 574.00

Tableau 1 : Barrage ARICHA

volume de terrassement	56 050 m ³
Limon	154 300 m ³
enrochements	7900 m ³
Sable	7300 m ³
Gravier	11000 m ³
cailloux	36 300 m ³
volume totale de la digue	216800 m ³

Tableau 4 : La Digue

Type	Déversoir à surface libre à seuil courbe suivi d'un coursier à forte pente
Implantation	Rive droite
Côte de seuil	580 NGM
Longueur de déversement	50 m
Charge max pour Qp	2.30 m
volume de terrassement	18210 m ³
Volume de béton	590 m ³

Tableau 5 : Evacuateur de crue

Type	conduite circulaire en acier enrobé d'un anneau en béton armé
Implantation	rive droite
Côte de calage à l'entrée	565 NGM
Pente	2%
Dimension	φ 800 mm
Longueur	132 m
Volume de terrassement	440 m ³
Volume de béton armé	210 m ³

Tableau 6 : Vidange de fond

Cout Global :	17.000.000 DH
---------------	---------------