

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila

Institut des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil et Hydraulique



N°Ref :.....

Projet de Fin d'Etude préparé en vue de l'obtention du diplôme

de MASTER

Spécialité : Hydraulique Urbaine

**CONCEPTION D'UN DRONE POUR L'ESTIMATION DE
LA VASE DANS LES RETENUES DES BARRAGES : CAS
DU BARRAGE DE BENI HAROUN**

Réalisé par :

- Guendouz Seyyid Ali

Soutenu devant le jury :

Dr. Koussa Miloud
Pr. Kabour Abdesselem
Dr. Chebbah Lynda
Dr. Bouchenitfa Hichem

Président
Examineur
Promotrice
Co-Promoteur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciement

Au terme de la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à l'égard de ma recherche et pour avoir gracieusement accepté de l'examiner et de l'évaluer. Leur présence et leur engagement avec le contenu de la recherche témoignent de leur engagement envers l'excellence académique et leur contribution à l'avancement des connaissances dans le domaine des études supérieures.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers Dr. Zeghmare Amer pour son précieux soutien et son aide qui ont grandement contribué à la réussite de mon mémoire. Ses directives efficaces et sa généreuse disponibilité ont toujours été une source d'inspiration et de soutien tout au long de ce parcours académique fructueux. Je garderai un souvenir reconnaissant de sa bienveillance et de notre collaboration.

Dr. Chebbah,

Je tiens à vous exprimer ma profonde gratitude pour votre accompagnement précieux tout au long de l'élaboration de ma thèse de master. Votre expertise, votre patience et votre soutien indéfectible ont été d'une aide inestimable pour moi.

Votre capacité à guider chaque étape du processus, ainsi que votre disponibilité à répondre à mes questions et à résoudre mes doutes, ont été remarquables. Je suis particulièrement reconnaissant pour votre patience infinie à mon égard. Votre engagement envers mon travail et votre soutien constant ont grandement contribué à mon apprentissage et à ma réussite académique. Je suis honoré d'avoir pu bénéficier de vos conseils éclairés et de votre expertise tout au long de ce projet.

Encore une fois, je vous remercie sincèrement pour tout ce que vous avez fait pour moi. Je garde un souvenir précieux de notre collaboration et je suis reconnaissant d'avoir eu la chance de travailler sous votre direction. Veuillez agréer, Dr. Chebbah, l'expression de ma haute considération.

Bien cordialement,

Seyyid Ali

Résumé :

La mesure de l'envasement par bathymétrie consiste à utiliser des techniques de relevé bathymétrique pour évaluer la quantité de sédiments accumulés dans une zone aquatique, telle qu'un lac, une rivière, ou un réservoir. En combinant l'innovation technologique avec les besoins croissants en surveillance environnementale, l'utilisation de drones flottants et volants équipés de capteurs d'échosondage pour la bathymétrie représente une étape significative vers une gestion plus efficace et durable des ressources hydriques.

Dans ce mémoire, nous avons utilisé des données bathymétriques obtenues auprès de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) pour quantifier les sédiments accumulés dans la retenue du barrage de Beni Haroun durant la période 2003 - 2013. Les résultats montrent une dynamique significative du volume du lac entre sa mise en eau (2003) et 2013. Les cartes topographiques et bathymétriques générées ont permis une visualisation détaillée des variations de la morphologie du bassin. En quantifiant les dépôts de sédiments annuels, nous avons pu montrer que la capacité du barrage a diminué de 10,96 % en 10 ans, soit un taux annuel de 1.09 %. L'apport solide estimé dans le cadre de l'étude d'avant-projet du barrage est de 6 hm³/an, soit 60 hm³ par 10 ans, dans la réalité on remarque que durant cette décennie il est supérieur de cette estimation d'une valeur de 22.86 hm, on remarque que l'envasement est accéléré par 14 % par rapport l'étude de l'avant-projet.

Mots-clés : Drone, Estimation des sédiments, Barrage de Beni Haroun, Bathymétrie, SIG, Gestion des ressources hydriques

Abstract:

Measuring siltation using bathymetry involves using bathymetric survey techniques to assess the amount of accumulated sediment in an aquatic area, such as a lake, river or reservoir. By combining technological innovation with the growing need for environmental monitoring, the use of floating and flying drones equipped with echo-sounding sensors for bathymetry represents a significant step towards more efficient and sustainable management of water resources.

In this thesis, we used bathymetric data obtained from the Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) to quantify the sediments accumulated in the Beni Haroun dam reservoir over the period 2003 - 2013. The results show a significant dynamic in the volume of the lake between its impoundment (2003) and 2013. The topographic and bathymetric maps generated have enabled detailed visualisation of the variations in the morphology of the basin. By quantifying annual sediment deposits, we were able to show that the capacity of the dam has decreased by 10.96% in 10 years, i.e. an annual rate of 1.09%. The solid input estimated in the preliminary design study for the dam was 6 hm³/year, or 60 hm³ per 10 years. In reality, it was 22.86 hm more than this estimate, and siltation accelerated by 14% compared with the preliminary design study.

Keywords: Drone, Sediment estimation, Beni Haroun dam, Bathymetry, GIS, Water resources management

ملخص :

ينطوي قياس الطمي باستخدام قياس الأعماق على استخدام تقنيات مسح الأعماق لتقييم كمية الرواسب المتراكمة في منطقة مائية، مثل بحيرة أو نهر أو خزان. ومن خلال الجمع بين الابتكار التكنولوجي والحاجة المتزايدة للرصد البيئي، يمثل استخدام الطائرات بدون طيار العائمة والطائرة المزودة بأجهزة استشعار لقياس الأعماق بالصدى خطوة مهمة نحو إدارة أكثر كفاءة واستدامة للموارد المائية.

وقد استخدمنا في هذه الأطروحة بيانات قياس الأعماق التي حصلنا عليها من الوكالة الوطنية للسدود والتحويلات (ANBT) لقياس كمية الرواسب المتراكمة في خزان سد بني هارون خلال الفترة 2003-2013. تُظهر النتائج ديناميكية كبيرة في حجم البحيرة بين فترة الحجز (2003) و2013. وقد مكنت الخرائط الطبوغرافية وخرائط قياس الأعماق التي تم إنشاؤها من تصور مفصل للتغيرات في مورفولوجية الحوض. ومن خلال تحديد كمية الترسبات السنوية للرواسب، تمكنا من إظهار أن سعة السد قد انخفضت بنسبة 10.96% خلال 10 سنوات، أي بمعدل سنوي قدره 1.09%. كانت المدخلات الصلبة المقدرة في دراسة التصميم الأولي للسد 6 هكتومتر مكعب/سنوياً، أو 60 متر مكعب في 10 سنوات، وفي الواقع كانت 22.86 هكتومتر مكعب أكثر من هذا التقدير، وتسارع الطمي بنسبة 14% مقارنة بدراسة التصميم الأولي.

الكلمات المفتاحية: طائرة بدون طيار، تقدير الرواسب، سد بني هارون، قياس الأعماق، نظم المعلومات الجغرافية، إدارة الموارد المائية

SOMMAIRE

Remerciement	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

PARTIE 1 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I: EROSION HYDRIQUE

Introduction.....	3
I.1 Erosion hydriques	3
I.1.1 Définition	3
I.2 Etapes et mécanisme de l'érosion hydriques	3
I.2.1 Le détachement	4
I.2.2. Le ruissellement	4
I.2.3 Le transport	4
I.2.4. La sédimentation (dépôt)	4
I.3 Les différentes formes de l'érosion hydrique	5
I.3.1 Dans les interfluves	5
➤ L'érosion en nappe : (SHEET EROSION) :	5
➤ L'érosion en griffes ou en rigoles (Microchannel ou Rill erosion) :	5
➤ L'érosion par ravinement (Gully erosion)	5
➤ La solifluxion :	6
➤ L'érosion rampante :	6
➤ Les glissements de terrains:	6
➤ Les coulées de boue:	6
I.3.2 Dans le réseau hydrographique « érosion linéaire »	6
I.4 Les facteurs de l'érosion hydrique.....	7
I.4.1 Le climat	7
▪ Le changement climatique.....	8
I.4.2 La Topographie :	8
I.4.3 La lithologie	8

I.4.4 Le couvert végétal	9
I.4.5 Les activités humaines.....	9
I.5 Effets de l'érosion hydrique	9
I.6 Quantification de l'érosion hydrique.....	10
I.6.1 Mesures par l'étude de la sédimentation dans les retenues	10
➤ Mesures Bathymétriques.....	10
➤ Échantillonnage des Sédiments	10
➤ Modélisation et Simulations	11
➤ Surveillance par Télédétection	11
➤ Analyse des Apports et des écoulements.....	11
I.6.2 Mesure de transport solide.....	11
▪ Transport solide par charriage	11
▪ Transport solide en suspension.....	12
I.7 Impact de l'érosion hydrique	12
I.7.1 Sur l'environnement	13
I.7.2 Sur le domaine socio-économique.....	14
Conclusion	15

CHAPITRE II: ENVASEMENT DES BARRAGES

Introduction	17
II.1 Origine et définition de l'envasement	17
II.2 Processus et étapes de l'envasement	18
II.2.1 Érosion des sols	18
II.2.2 Transport des sédiments	18
II.2.3 Déposition des sédiments	18
II.2.4 Accumulation	19
II.2.4 Tassement	19
II.2.5 Consolidation	19
II.3 Les facteurs influencent sur l'envasement des retenues.....	20
II.4 Les méthodes d'estimation de la vase	20
II.4.1 Méthodes directes	20
II.4.1.1 Mesure de charriage	22

II.4.1.2 Mesure de la suspension	24
II.4.2 Méthodes indirectes	25
II.5 Problèmes imposés par l'envasement	26
II.6 Conséquences de l'envasement.....	26
II.7 Valorisation de la vase.....	27
II.8 Statistique sur l'envasement des barrages en Algérie.	27
II.9 Lutte contre l'envasement	29
II.9.1 Méthodes préventives	29
II.9.2 Méthodes curatives	30
Conclusion	31

CHAPITRE III : TECHNIQUE DE LA BATHYMÉTRIE

DANS LE DOMAINE DES BARRAGES

Introduction	32
III.1 Principes de base de la bathymétrie	32
III.1.1 Définition	32
III.1.2 Objectifs	32
III.2 Applications de la bathymétrie dans le domaine des ressources en eau	33
III.2.1. Cartographie des lits de rivières.....	33
III.2.2. Modélisation des courants et des flux hydrauliques	33
III.2.3. Surveillance de l'écosystème aquatique.....	33
III.3 Utilisation de la bathymétrie dans le domaine des barrages	34
III.3.1 Planification et conception de barrages	34
III.3.2. Évaluation du volume d'eau et de la capacité de stockage.....	34
III.3.3. Suivi des sédiments et de l'érosion	34
III.3.4 Prévention des risques	34
III.3.5 Décommissionnement	34
III.4. Méthodes de mesures des profondeurs	35
III.4.1 Anciennes méthodes	35
➤ Jalonnement et Plombs à Sonde	35
➤ Échantillonnage du Fond.....	36
➤ Mesures Indirectes	36

III.4.2 Méthodes modernes	36
➤ Échosondeur acoustiques mono-faisceau.....	36
➤ Échosondeur multifaisceaux	36
➤ Lidar bathymétrique	38
➤ Le SONAR par interférométrie	39
III.5 Collecte de données bathymétriques et planification des levés	41
III.5.1. Objectifs	41
III.5.2 Sélection des Équipements	41
III.5.3 Méthodes de Collecte de Données	42
III.5.4 Gestion des Facteurs Environnementaux	42
III.5.5 Sécurité et conformité réglementaire	42
III.6 Acquisition des données sur le terrain	42
III.6.1 Drones aéroportés	42
➤ Préparation des drones	43
➤ Sélection des trajectoires de vol	43
➤ Configuration des paramètres de vol	43
➤ Déploiement sur le terrain	43
➤ Collecte des données bathymétriques	43
➤ Contrôle qualité en temps réel	43
➤ Documentation et analyse des données	43
III.6.2 Photogrammétrie par drone.....	44
III.6.3 Le lidar par drone.....	45
III.7 Techniques de positionnement et d'orientation des drones quadricoptère	46
III.7.1 Positionnement GNSS pour les Coordonnées (x,y)	46
III.7.2 Utilisation de la sonde ultrasonique pour la profondeur (z)	46
III.7.3 Correction des erreurs et des dérives	46
III.7.4 Utilisation des données visuelles pour l'orientation :.....	46
III.7.5 Le système de positionnement	47
III.8 Défis et limites de la bathymétrie	48
III.8.1 Profondeurs extrêmes	48
III.8.2 Obstacles et structures sous-marines	48
III.8.3 Conditions environnementales	48

III.8.4 Coût et complexité des équipements	48
III.8.5 Limitations de résolution	48
III.9 Perspectives futures et innovations	48
III.9.1 Amélioration de la résolution et de la précision	49
III.9.2 Utilisation de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique	49
III.9.3 Miniaturisation des capteurs et des équipements	49
III.9.4 Intégration de données multi-sources	49
III.9.5 Développement de capteurs multimodaux	49
III.9.6 Utilisation de la télédétection et de l'imagerie satellitaire	49
Conclusion	50

PARTIE II

ETUDE DE LA CONCEPTION DU DRONE BATHYMETRIQUE

CHAPITRE IV : APERÇU SUR L'ÉQUIPEMENT

Introduction.....	51
IV.1 Les composants essentiels d'un drone quadricoptères	51
IV.1.1 Cadre	51
IV.1.2 Moteurs	52
IV.1.3 Hélices	53
IV.1.4 Contrôleurs de vol	54
IV.1.5 Batterie	55
IV.1.6 Système de transmission	56
IV.1.7 Capteurs	58
IV.1.8 Système de Navigation	60
Conclusion	61

CHAPITRE V : CONCEPTION D'UN QUADRICOPTÈRE BATHYMETRIQUE

Introduction	63
V.1.Conception du quadricoptère F450	63

V.1.1 Châssis F450	63
V.1.1.1 <i>Présentation du châssis F450</i>	63
V.1.1.2 <i>Caractéristiques du châssis F450</i>	64
V.1.1.3 <i>Importance du châssis F450</i>	65
V.1.1.4. <i>Application spécifique dans le projet</i>	65
V.1.2 Logiciels nécessaires pour la conception du châssis F450	65
V.1.2.1 <i>SolidWorks</i>	66
V.1.2.2 <i>AutoCAD</i>	66
V.1.2.3 <i>Cura ou Simplify3D</i>	66
V.1.2.4 <i>Fusion 360</i>	66
V.1.3 Conception des composants du Châssis	67
V.1.3.1 Conception des bras	67
V.1.3.2. Conception de la plaque centrale supérieure	68
V.1.3.3 Conception de la plaque centrale inférieure	69
V.1.3.4 Conception des pieds du quadricoptère	69
V.1.4. L'assemblage des composants	70
V.2. Conception des autres composantes utilisées dans notre appareil	71
V.2.1. Contrôleur de vol	71
V.2.2. Raspberry Pi	71
V.2.3. Brushless Motors	72
V.2.4. Hélice	72
V.2.4. GPS	73
V.2.5 ECT400	73
V.3 Mission d'un quadricoptère dans un barrage.....	74
V.3.1 Préparation de la mission	74
V.3.2 Planification des itinéraires de vol	75
V.3.3 Vérification des conditions météorologiques	76
V.3.4 Collecte des données géo-spatiales	76
Conclusion	78

CHAPITRES VI : ESTIMATION DE L'ENVASEMENT PAR BATHYMETRIE, CAS DU BARRAGE DE BENI HAROUN

Introduction.....	79
VI.1 Généralités sur la région d'étude	79
VI.1.1 Situation géographique	79
VI.1.2 Aperçu Géologique	80
VI.1.3 Aperçu Climatique et hydrologique	82
➤ <i>Crues et étiages</i>	82
➤ <i>Apports liquides</i>	82
➤ <i>Apports solides</i>	83
VI.1.4 Caractéristiques techniques du barrage du beni haroun	83
➤ <i>Retenue</i>	83
➤ <i>Barrage</i>	84
➤ <i>Evacuateur de crue</i>	84
➤ <i>Vidange de demi-fond</i>	84
VI.2 Estimation de l'envasement par bathymétrie.....	85
VI.2.1 Collecte des données	85
- Les données de l'ANBT	85
- Les données de Google Earth	85
- Model Numérique du Terrain.....	85
VI.2.2 Préparation des données	86
VI.2.3 : Calcul du volume du lac du barrage	86
VI.2.3.1. Volume du lac par rapport au NNR	87
VI.2.3.2. Volume du lac par rapport au niveau des plus hautes eaux (NPHE)	90
Discussion	92
VI.2.4. Cartes Topographiques	92
Interprétation des cartes	94
VI.2.4.1 Calcul du volume d'envasements	94
VI.2.5. Courbes capacité-niveau-surface	94
VI.2.5. Cartes bathymétriques	96
Discussion	97
Conclusion	98
Conclusion générale.....	99

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 L'effet Splash.	4
Figure I.2 Etapes de l'érosion hydrique	5
Figure I.3 Quelques formes de l'érosion hydrique dans les interfluves.	6
Figure I.4 Erosion des berges.....	7
Figure I.5 Les facteurs climatiques actifs sur l'érosion hydrique.	8
Figure I.6 Modes de transport solide.	12
Figure II.1 Dépôt de vase.....	18
Figure II.2 Processus de l'envasement des barrages.....	19
Figure II.3 Bathymétrie par nivellement.....	21
Figure II.4 Bathymétrie par échosondeur.	21
Figure II.5 Remplissage d'une ancienne fosse d'extraction sur la rivière de l'Esconavette	22
Figure II.6 Pièges à sédiment.....	23
Figure II.7 Différents types de préleveurs de charriage.....	24
Figure II.8 Différents types de préleveurs en suspension.	25
Figure II.9 État des barrages en Algérie	28
Figure II.10 État d'envasement des barrages Fergoug et Bakhadda en 2008.....	28
Figure II.11 Techniques de lutte contre l'envasement.....	29
Figure II.12 Quelques techniques préventives.....	30
Figure II.13 Techniques curatives.....	31
Figure III.1 Application de la bathymétrie dans le domaine des ressources en eaux.	33
Figure III.2 Application de la bathymétrie dans le domaine des barrages.....	35
Figure III.3 Sondeur mono-faisceau.	37
Figure III.4 Sondeur multifaisceaux.	38
Figure III.5 Faisceaux d'émissions et de réceptions.	38
Figure III.6 Représentation schématique de la bathymétrie laser aéroportée utilisant un laser vert à pénétration d'eau pour détecter la surface et le fond de l'eau et un laser infrarouge supplémentaire pour détecter uniquement l'interface air-eau	40
Figure III.7 Visualisation en temps réel des données acquises par le SONAR EdgeTech.	41
Figure III.8 Drone aéroporté.....	44
Figure III.9 Photogrammétrie par drone.	45
Figure III.10 LiDAR bathymétrique..	45
Figure III.11 Drone quadricoptère équipé d'un échosondeur.....	47
Figure IV.1 : Différents matériaux pour la fabrication des cadres	52
Figure IV.2 : Moteur Brushless	53
Figure IV.3 : Contrôle de Vitesse 30A	53
Figure IV.4 : Hélice pour drone quadricoptères.....	54
Figure IV.5 : Contrôleurs de vol pour drones racer	55
Figure IV.6 : Batterie LiPo à quadricoptère drone.....	56
Figure IV.7 : Kits de transmission vidéo 4G.....	58
Figure IV.8: Gyroscopes pour UAV (Différent modèle).....	59
Figure IV.9: Accéléromètres pour drone	59

Figure IV.10 : Module GPS pour drone	60
Figure IV.11: Capteur imperméable de distance à ultrasons	60
Figure IV.12: Navigation d'un drone par un système de satellites	61
Figure V.1 : Châssis quadrirotor F450 avec PDB intégré.	64
Figure V.2 : Dimensions du châssis F450.	64
Figure V.3 : Icones des logiciels utilisés.	67
Figure V.4 : Conception des bras.	68
Figure V.5: Plaque centrale supérieure	68
Figure V.6 : Plaque centrale inférieure	69
Figure V.7: Pied du châssis F450.	69
Figure V.8 : Assemblage des composants du quadricoptère.	70
Figure V.9 : Pixhawk 2.4.8 en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks	71
Figure V.10 : Raspberry-Pi en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks	72
Figure V.11 : Brushless DC Motor en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks.	72
Figure V.12 : Hélice en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks.	73
Figure V.13 : Module GPS en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks.....	73
Figure V.14 : Echosondeur ECT400 en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks.	74
Figure V.15 : Echosondeur ECT400 en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks.	74
Figure V.16: Icône des logiciels de planification des itinéraires de vol.....	75
Figure 4 Exemple de planification des itinéraires de vol dans le réservoir du barrage de Beni haroun avec QGroundControl.....	75
Figure V.18 : La manche à air réglementaire.	76
Figure VI.1 : Situation géographique du site d'étude.	80
Figure VI.2. Géologie du site du barrage de Beni Haroun.	81
Figure VI.3. Coupe géologique du site de barrage de Beni Haroun.	81
Figure VI.4. Graphe des températures moyennes annuelles de la station de Beni Haroun	82
Figure VI.5. Graphe des précipitations annuelles de la station de Beni Haroun	82
Figure VI.6. Variation des débits mensuelle et saisonnière durant la période1973-2011 des stations hydrométriques de Grarem et Tassadane	83
Figure VI.7 : Coupe évacuateur de crue du barrage de Beni Haroun	84
Figure VI.8 : Choix de la zone d'étude à l'aide de earthexplorer	85
Figure VI.9 : Positionnement des points sur la retenue du barrage de Beni Haroun.	86
Figure VI.10 : Surface et Périmètre du lac de Beni Haroun selon ArcGIS Pro.	87
Figure VI.11 : Volume du lac de Beni Haroun avant la mise en eaux (2000) selon ArcGIS Pro (NNR).	88
Figure VI.12 : Histogramme de la distribution des volumes de la retenue du barrage de Beni haroun (NNR).	88
Figure VI.13 : Volume du lac de Beni Haroun en 2013 selon ArcGIS Pro (NNR).	89
Figure VI.14 : Histogramme de la distribution des volumes de la retenue du barrage de Beni haroun en 2013 (NNR).....	89
Figure VI.15 : Forme du lac à la courbe de niveau 214.8 m (NPHE).	90
Figure VI.16 : Volume du lac de Beni Haroun avant la mise en eau NPHE (2000).	90

Figure VI.17 : Histogramme de la distribution des volumes avant la mise en eau en 2000 (NPHE).	91
Figure VI.18 : Volume du lac de Beni Haroun en 2013 (NPHE).	91
Figure VI.19 : Histogramme de la distribution des volumes après 10 ans d'exploitation en NPHE (2013).	92
Figure VI.20 : Carte topographique du barrage de Beni Haroun avant la mise en eau (2000).	93
Figure VI.21 : Carte topographique du barrage de Beni Haroun en 2013 (10 ans d'exploitation).	93
Figure VI. 22: Courbe capacité-niveau-surface avant la mise en eaux (2002)	95
Figure VI. 23: Courbe capacité-niveau-surface après 10 ans d'exploitation (2013)	96
Figure VI.24 : Evolution des volumes d'eau et de vase en fonction de la hauteur.	96
Figure VI.25 : Carte bathymétrique du lac du Barrage de Beni Haroun avant la mise en eau (2000).	97
Figure VI.26 : Carte Bathymétrique du lac du Barrage de Beni Haroun après 10 ans d'exploitation (2013).	97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 : Évolution de la situation des barrages Algériens	28
---	----

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans un monde où les technologies et les innovations évoluent rapidement, l'utilisation de technologies avancées pour la gestion des ressources en eau, notamment en ce qui concerne les problèmes de sédimentation dans les réservoirs des barrages, devient de plus en plus importante.

La sédimentation représente l'un des principaux défis auxquels sont confrontés les barrages, car elle réduit leur capacité de stockage, affecte leur efficacité dans la gestion de l'eau et la régulation des inondations et limitant ainsi sa capacité à fournir de l'eau pour divers usages tels que l'agriculture et la consommation humaine, de plus, les sédiments affectent également l'environnement fluvial autour du barrage, pouvant entraîner des changements dans l'écologie et des impacts négatifs sur les espèces et les écosystèmes. La gestion et la réduction des sédiments représentent donc des défis importants qui nécessitent l'application de technologies avancées pour maintenir l'efficacité à long terme des barrages.

L'utilisation de technologies avancées pour déterminer les quantités de sédiments dans les barrages est une étape essentielle pour comprendre et gérer ce problème de manière plus efficace. Cela inclut l'utilisation de satellites et de drones pour capturer des images satellites de haute résolution, ce qui aide à déterminer précisément la répartition et l'évolution des sédiments dans le lac du barrage à différents moments. De plus, les technologies bénéficient des systèmes de surveillance automatisés à l'intérieur des barrages, qui mesurent continuellement le niveau et la concentration des sédiments de manière précise et en temps réel, permettant ainsi l'émission de rapports périodiques sur l'état des sédiments. La modélisation numérique joue également un rôle prépondérant dans l'analyse des données et la création de modèles pour les flux d'eau et le dépôt de sédiments, facilitant ainsi la prévision des mouvements des sédiments et de leurs effets sur les barrages et l'environnement environnant. En outre, les techniques de détection avancées telles que le sonar, le radar et le laser sont utilisées pour mesurer l'épaisseur et les propriétés physiques des sédiments à l'intérieur des lacs des barrages, contribuant à déterminer avec précision les concentrations de sédiments et à analyser en détail leurs caractéristiques.

En utilisant ces technologies, les ingénieurs et les chercheurs peuvent améliorer leur gestion des dépôts de sédiments dans les barrages et développer des stratégies efficaces pour réduire les effets négatifs sur l'environnement et l'infrastructure des barrages. Les programmes de systèmes d'information géographique tels que ArcGIS et QGIS jouent un rôle déterminant dans la gestion des ressources en eau et la modélisation des quantités de sédiments dans les barrages. Ces programmes permettent aux utilisateurs d'analyser de manière précise et efficace les données géographiques, permettant de surveiller et de suivre la distribution des sédiments à l'intérieur du lac du barrage grâce à des images satellites de haute résolution. De plus, ces programmes offrent

des outils pour créer des modèles hydrologiques détaillés qui simulent les flux d'eau et le mouvement des sédiments à l'intérieur des barrages, facilitant ainsi l'estimation de la quantité de sédiments et de leurs effets sur la capacité de stockage et les performances hydrologiques des barrages. En outre, la modélisation numérique permet d'analyser les données spatiales et temporelles pour prévoir les changements dans les dépôts de sédiments, aidant à prendre des décisions administratives durables et efficaces pour préserver les ressources en eau et réduire les effets des sédiments sur l'environnement et l'infrastructure des barrages.

Cette recherche constitue une avancée majeure dans la gestion des ressources en eau en utilisant des technologies avancées pour surveiller et gérer les dépôts de sédiments dans les réservoirs des barrages. La recherche vise à faire progresser notre compréhension des processus de dépôt de sédiments et de leur évolution, en intégrant des données provenant de sources multiples et en utilisant des technologies de drones modernes. Grâce à ces efforts, nous espérons que la recherche contribuera à renforcer la durabilité environnementale de l'infrastructure hydrologique et à améliorer l'efficacité de la gestion des ressources en eau à long terme, bénéficiant à la fois à la communauté locale et aux professionnels des domaines de l'ingénierie et des sciences environnementales.

Le mémoire est structuré en deux parties :

La première partie est une recherche bibliographique, contient trois chapitre; Le premier chapitre présente : l'érosion hydrique, le deuxième chapitre présente une revue de littérature sur l'envasement des barrages, le troisième chapitre présente : la Technique de la bathymétrie dans le domaine des barrages.

La deuxième partie, comporte trois chapitres aussi, le premier est une description des différents équipements utilisés dans les drones bathymétriques, le deuxième chapitre est la conception de notre quadricoptère bathymétriques, le troisième chapitre c'est l'Estimation de l'envasement par Bathymétrie, en utilisons comme cas d'étude le barrage de Beni Haroun.

Partie I :

Synthese bibliographique

Chapitre I

CHAPITRE I : EROSION HYDRIQUE

Introduction

Tous les sols sont naturellement soumis à l'érosion, qui renvoie à l'amincissement de la couche arable d'un champ sous l'effet des forces érosives naturelles de l'eau et du vent, ou sous l'effet des activités agricoles, comme le travail du sol.

L'érosion hydrique, aussi appelée érosion par l'eau, est un processus naturel qui joue un rôle crucial dans la formation et l'évolution des paysages mais peut aussi causer des problèmes environnementaux et économiques significatifs. Elle survient lorsque l'eau, sous diverses formes, déplace le sol, les minéraux et les matériaux organiques. Cela se produit généralement par l'action de la pluie, du ruissellement de surface, et des cours d'eau.

Le phénomène peut être lent et passer relativement inaperçu. Il peut aussi se produire à un rythme alarmant et causer alors de lourdes pertes de terre arable. Le compactage du sol, l'appauvrissement du sol en matière organique, la dégradation de la structure du sol, un mauvais drainage interne, des problèmes de salinisation et d'acidification du sol sont d'autres causes de détérioration du sol qui en accélèrent l'érosion.

I.1 Erosion hydriques

I.1.1 Définition :

L'érosion hydrique est un processus naturel par lequel le mouvement de l'eau, sous forme de précipitations, de ruissellement ou de courants, entraîne progressivement l'enlèvement et le transport des particules de sol et de sédiments. Ce processus peut se produire sur une variété d'échelles, allant des minuscules particules de sol déplacées par les gouttes de pluie aux grands volumes de sol emportés par les inondations et les cours d'eau. L'érosion hydrique emporte et redistribue le sol. Bien qu'une certaine érosion se produise graduellement, le phénomène est surtout imputable à des événements météorologiques extrêmes (une forte pluie). (RADJAH S, 2017)

L'action de l'eau sur un versant dépend de facteurs variés tels que la pente, la lithologie, l'importance de l'altération superficielle ou des dépôts se répercutent sur les possibilités d'infiltration. Lorsque la perméabilité est faible, le ruissellement est favorisé.)

I.2 Etapes et mécanisme de l'érosion hydriques

Les trois étapes par lesquelles passe l'érosion sont le détachement, le transport et la sédimentation. Cependant, il est à signaler que la pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine du détachement, du transport et du dépôt des particules du sol arrachées.

I.2.1 Le détachement :

Les principaux mécanismes conduisant au détachement sont : l'humectation par l'effet de l'impact de gouttes de pluies, l'éclatement, la désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie « spalsh » (Figure I.1).

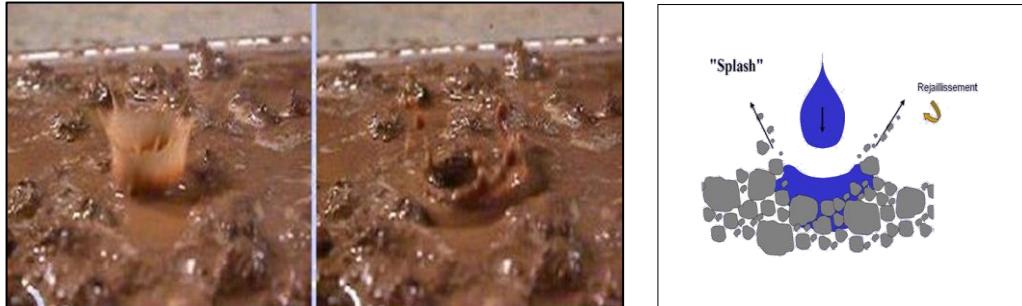


Figure I.1 : L'effet Splash.

(<https://vegeforce-en-faveur-de-mon-environnement-03.websself.net/forfaits>)

I.2.2. Le ruissellement :

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface, soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe.

I.2.3 Le transport :

Il est dû à la fois aux gouttes d'eau de pluie (par rejaillissement= effet splash) et aux eaux de ruissellement. Ainsi, le transport est assuré par ces eaux. Cependant, il est à signaler que le mode de transport par effet splash est généralement négligeable sauf sur pente forte. Alors que les eaux de ruissellement sont les plus responsables du transport des particules du sol détachées. Les modes de transport par ruissellement sont illustrés sur la figure I.2.

I.2.4. La sédimentation (dépôt) :

L'agent responsable de la sédimentation est l'eau de ruissellement. Les particules arrachées du sol se déposent entre le lieu d'origine et l'aval en fonction de plusieurs facteurs, leur dimension, leur densité, la capacité de transport du ruissellement ou du cours d'eau.

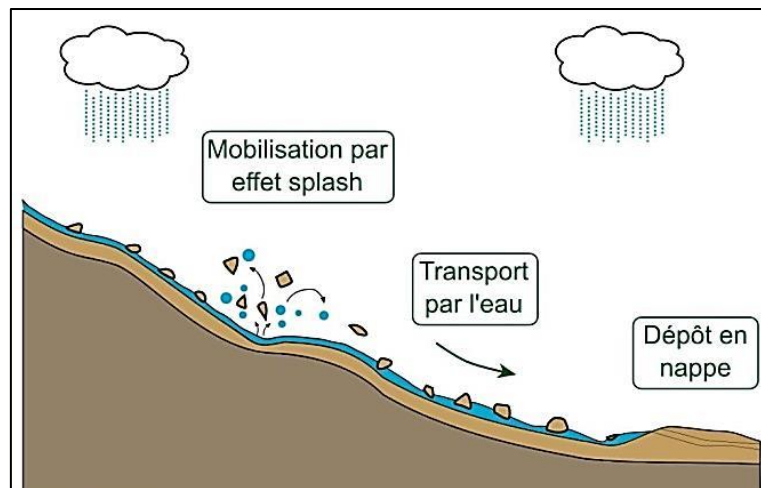


Figure I.2 Etapes de l'érosion hydrique (<https://www.grandcalais.fr/semaine-eau-erosion-ruissellement/>)

I.3 Les différentes formes de l'érosion hydrique :

I.3.1 Dans les interfluves :

➤ *L'érosion en nappe (SHEET EROSION) :*

Le mélange d'eau et de terre s'écoule le long des pentes comme une nappe et le sol se trouve découpé par couches successives (Fig I.3). Ce type d'érosion, difficile à déceler, reste la forme la plus répandue dans les champs cultivés. Sous son effet, les racines des arbres et des plantes se déchaussent progressivement. Les éléments fins (matières organiques, humus, argiles, limons) et les éléments nutritifs sont déplacés de l'amont du versant vers l'aval et, le plus souvent, gagnent les fossés et les rivières. Sur un même versant, on peut observer des différences de couleur des horizons superficiels dues à la migration de ces éléments fins (horizons clairs en amont et sur les terrains en pente, et horizons sombres en aval et sur terrains plats). (SABIR M, 1986.)

➤ *L'érosion en griffes ou en rigoles (Microchannel ou Rill erosion) :*

L'érosion en rigoles est un aspect de l'érosion linéaire. Elle se produit lorsqu'il y a des irrégularités à la surface du sol, souvent dues aux façons culturales (Fig I.3). Les eaux se concentrent, coulent suivant les lignes de moindre résistance et le ruissellement acquiert une certaine énergie abrasive qui met en mouvement des particules facilement détachables. Il en résulte des dépressions relativement petites (dont l'importance dépend de l'énergie du ruissellement et de la nature du sol) qui constituent des griffes ou filets ou encore rigoles. Ces rigoles disparaissent généralement après passage d'outils agricoles. (SABIR M, 1986.)

➤ *L'érosion par ravinement (Gully erosion)*

Est la forme culminante de l'érosion du sol, cette forme d'érosion déprécie considérablement la valeur et la productivité des terres agricoles. Les ravins et les ravines, sont responsables de la mobilisation et du transport des sédiments vers l'aval des bassins-versants. En plus de leur contribution substantielle à l'envasement des barrages, ils occasionnent une perte directe du patrimoine foncier.

<https://fac.umc.edu.dz/fst/fichiers/moon/7eme%20Cours%20erosion%20hydrique%20et%20eolienne.pdf>

➤ *La solifluxion :*

L'érosion par solifluxion fait référence au mouvement graduel du sol ou des sédiments vers le bas en raison du gel et du dégel du sol. Ce processus est courant dans les régions soumises à l'action du pergélisol ou du gel, ce qui entraîne un écoulement lent mais continu des matériaux vers le bas des versants. Les taux de solifluxion peuvent varier en fonction de facteurs tels que l'angle et l'orientation de la pente. (Gargarella R , 2022)

➤ *L'érosion rampante :*

C'est le déplacement graduel du sol ou des matériaux granulaires en raison de divers facteurs tels que les gradients de pression des fluides, les activités humaines ou les conditions géologiques.

➤ *Les glissements de terrains :*

Un glissement de terrain est le mouvement de masse de roches, de débris, de terre sur une pente. Si la plupart des glissements de terrain sont dus à la gravité, ils peuvent également être provoqués par les précipitations, la déstabilisation des pentes résultant de la déforestation, de la culture et de la construction, et la fonte des neiges ou des glaciers (Fig I.3).

➤ *Les coulées de boue :*

Elles se produisent lorsque les matériaux (surtout meubles) ont atteint et dépassé la limite de liquidité ; alors, l'ensemble perd sa cohésion et s'écoule. Les coulées boueuses peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de mètres dans le fond des vallées. (SABIR M, 1986.)



Erosion en nappe



Erosion en rigole



Glissement de terrain

Figure I.3 Quelques formes de l'érosion hydrique dans les interfluves.

(<https://www.eaufrance.fr/les-impacts-de-lerosion>)

I.3.2 Dans le réseau hydrographique « érosion linéaire » :

C'est une forme d'érosion due à la dissipation de l'énergie de l'eau dans les lits des cours d'eau et les rivières. L'énergie de ces dernières est capable, de manière régulière ou accidentelle (lors des inondations) d'emporter une partie des berges (Fig I.4). On appelle ce

processus le sapement des berges. Il se produit également dans les ravins en formation lorsque l'eau du ruissellement attaque les assises du ravin. Ce type d'érosion est étroitement lié au volume et à la vitesse de l'eau, qui dépend de la pente et du débit. L'érosion dans le réseau hydrographique se manifeste par deux processus : le creusement du lit et l'affouillement des berges. (RADJAH S, 2017)



Figure I.4 Erosion des berges.

(<https://arp-agritech.com/amenagement-des-berges/>)

I.4 Les facteurs de l'érosion hydrique

I.4.1 Le climat :

Les facteurs climatiques les plus actifs sur l'érosion hydrique restent les précipitations et, à un degré moindre, les températures et l'humidité.

Les précipitations, sous forme de pluie, restent la cause principale de l'érosion hydrique (d'où le terme érosion pluviale). La pluie intervient dans la destruction des agrégats (par la vitesse de chute des gouttes de pluie), dans l'enlèvement et le transport des matériaux détachés (par le ruissellement). Il s'en suit par conséquent que l'intensité de la pluie est un facteur clé pour déterminer la quantité de sédiments arrachés au sol. Une fois les particules détachées, la quantité de pluie qui ruisselle détermine le mouvement de sédiments des interfluves vers le réseau de drainage (Fig. I.5).

L'action de température et l'humidité intervient par les alternances de gel - dégel et d'humectation - dessiccation. Ces mécanismes importants dans la désagrégation des roches sont surtout liés aux variations thermiques diurnes. De même, une roche saturée d'eau qui absorbe de la chaleur se dilate facilement. (SABIR M, 1986.)

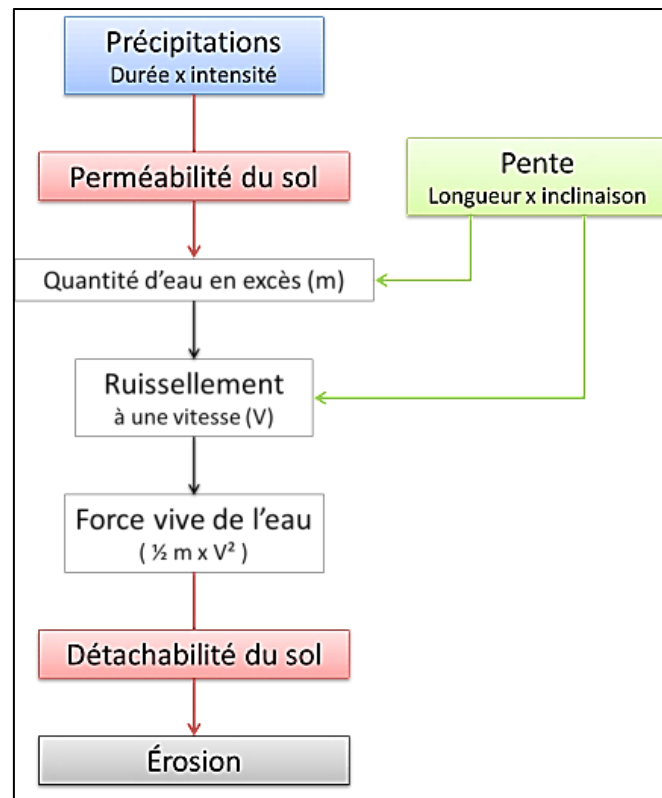


Figure I.5 Les facteurs climatiques actifs sur l'érosion hydrique.
(<https://www.supagro.fr/ress-pepites/Opale/ProcessusEcologiques/co/Erosion.html>)

▪ Le changement climatique

Le changement climatique influe de manière significative sur les processus d'érosion hydrique. L'augmentation des épisodes de précipitations extrêmes, la modification des régimes de précipitations et la modification des processus neigeux dus au changement climatique contribuent à modifier le transport des sédiments, les taux d'érosion et l'apport de sédiments dans les plans d'eau. Ces résultats soulignent la relation complexe entre le changement climatique et l'érosion hydrique, soulignant la nécessité de prendre des mesures proactives pour atténuer les risques croissants posés par l'évolution des conditions climatiques sur les processus d'érosion. (Cache et al, 2023 ; Uber et al., 2022)

I.4.2 La Topographie :

Plus la pente d'un champ est raide et plus cette pente est longue, plus les risques d'érosion sont grands. L'érosion hydrique augmente aussi avec la longueur de la pente à cause de l'augmentation du ruissellement. La fusion de petits champs pour en faire de plus grands a souvent pour conséquence d'allonger les pentes. Le débit de l'eau étant alors plus rapide, le transport des sédiments augmente, ce qui donne lieu à des risques accrus d'érosion et d'affouillement. (<https://www.ontario.ca/fr/page/lerosion-du-sol-causes-et-effets>)

I.4.3 La lithologie :

L'érodibilité du sol désigne sa susceptibilité face aux processus d'érosion. Elle est fonction des propriétés physico-chimiques du sol (texture, profondeur, porosité, teneur en matière

organique...) et de la cohésion qui existe entre ces particules. Une faible cohésion va entraîner une forte érodibilité.

Notons que l'érodibilité des sols diminue avec l'augmentation de la teneur en matière organique qui réduit la mouillabilité des agrégats et diminue les risques d'éclatement lors de l'humectation. (RADJAH S, 2017)

Il existe trois propriétés essentielles des sols pour déterminer leur érodibilité et pour évaluer leur résistance à l'érosion :

- La teneur en limon et surtout en argile ;
- La matière organique qui assure la cohésion du sol ;
- Les caractéristiques minéralogiques et chimiques des sols qui ont un rapport avec la cohésion.

I.4.4 Le couvert végétal :

Le facteur végétation est de loin le facteur le plus important. Lorsque le couvert végétal est continu, qu'il s'agisse de forêts, de fourrés, de savane ou d'un simple paillis, l'érosion et le ruissellement restent très faibles malgré l'agressivité des pluies et l'inclinaison de la pente. Mais lorsque le sol est totalement dénudé, les phénomènes d'érosion deviennent catastrophiques : les pertes en terre sont multipliées par 1000 et le ruissellement par 20 à 50. La densité, la période de la plantation et l'utilisation d'une fumure correcte jouent un rôle prépondérant. (Roose. E.J et Lelong F, 1976)

I.4.5 Les activités humaines

Certaines activités humaines provoquent l'accélération de rythme naturel de l'érosion hydrique par l'action de : surpâturage, défrichements, certaines techniques culturales et l'urbanisation. Ces actions peuvent contribuer de façon significative aux quantités de sédiments apportées au réseau de drainage du voisinage et modifier le développement futur des phénomènes de sédimentation dans les bassins fluviaux. (SABIR M, 1986.)

I.5 Effets de l'érosion hydrique :

L'érosion hydrique a des conséquences importantes sur la fertilité des sols, la perte de nutriments, la pollution de l'eau, le rendement des cultures et les pertes économiques. Dans les régions où l'érosion due à l'eau et au travail du sol est répandue, les effets combinés accélèrent les pertes de sol, ce qui entraîne des problèmes environnementaux tels que la pollution de l'eau, la dégradation des sols et la réduction de la production agricole. (Rickson J, 2023).

Les répercussions de l'érosion des sols vont au-delà de la perte de sol arable, déplacer ou carrément emporter les semences et les plants. Les pertes de sol peuvent nuire à la qualité, à la structure, à la stabilité et à la texture du sol. Toute modification de la texture du sol peut à son tour nuire à la capacité de rétention d'eau du sol et exposer davantage celui-ci à des conditions extrêmes telles que la sécheresse. (<https://www.ontario.ca/fr/page/lerosion-du-sol-causes-et-effets#section-3>)

Les sédiments qui atteignent des cours d'eau peuvent accélérer l'érosion des berges, ensabler les fossés de drainage et les cours d'eau, envaser les réservoirs, endommager l'habitat des poissons et dégrader la qualité de l'eau en aval. Les pesticides et engrais, souvent emportés avec les particules de sol, contaminent ou polluent les sources d'eau, les terres humides et les lacs en aval. Du fait de la gravité de certaines des répercussions de l'érosion hors du champ, la pollution diffuse de source agricole est un point important à considérer. (<https://www.ontario.ca/fr/page/lerosion-du-sol-causes-et-effets#section-3>)

I.6 Quantification de l'érosion hydrique

La quantification de l'érosion hydrique est cruciale pour comprendre la perte de sol et mettre en œuvre des mesures efficaces de contrôle de l'érosion. Divers modèles tels que RUSLE et EPM, combinés au SIG et à la télédétection, ont été utilisés pour évaluer les taux d'érosion dans différentes régions. En intégrant ces modèles à des systèmes d'information géographique, les chercheurs peuvent cartographier les risques d'érosion, identifier les zones vulnérables et développer des stratégies ciblées de contrôle de l'érosion afin d'atténuer les effets négatifs de l'érosion hydrique sur la qualité des sols et les ressources en eau. (Aoufa M et al., 2022 ; Kabili S et al., 2023)

I.6.1 Mesures par l'étude de la sédimentation dans les retenues :

Les mesures de la sédimentation dans les réservoirs sont très importantes pour évaluer la perte de capacité de stockage et mettre en œuvre des stratégies de gestion efficaces. Diverses méthodes, telles que des mesures originales, des calculs hydrologiques, des relevés bathymétriques et des applications ArcGIS, ont été utilisées pour quantifier l'accumulation de sédiments dans les réservoirs. Des études ont montré des réductions importantes du volume des réservoirs en raison de l'accumulation de sédiments, certains réservoirs perdant jusqu'à 70 % de leur capacité en plusieurs décennies. En outre, l'impact de la sédimentation sur la gestion de l'eau, la lutte contre les inondations et la production d'énergie souligne l'importance de surveiller et de traiter l'accumulation de sédiments dans les réservoirs afin de garantir une gestion durable des ressources en eau. (Gonzalez R et Al, 2023)

➤ Mesures Bathymétriques

Les mesures bathymétriques consistent à cartographier les fonds des retenues pour déterminer les volumes et les configurations de la sédimentation. Cette technique utilise souvent des sondeurs acoustiques ou des échosondeurs qui émettent des ondes sonores et mesurent leur temps de retour après avoir rebondi sur le fond. En comparant les données bathymétriques recueillies à différents moments, on peut calculer le taux de sédimentation au fil du temps. (Laval M et al., 2012)

➤ Échantillonnage des Sédiments

Des carottages de sédiments peuvent être effectués pour obtenir des échantillons du fond de la retenue. Ces carottes sont ensuite analysées en laboratoire pour déterminer la composition, la granulométrie, et d'autres caractéristiques physico-chimiques des sédiments. Cette méthode

permet de déduire l'origine des sédiments et d'évaluer la dynamique de sédimentation sur une échelle de temps longue

➤ *Modélisation et Simulations*

Des modèles hydrologiques et sédimentologiques peuvent être utilisés pour simuler le transport des sédiments dans le bassin versant et leur accumulation dans la retenue. Ces modèles peuvent intégrer des données météorologiques, hydrologiques, topographiques, et de couverture des sols pour prédire les flux de sédiments sous divers scénarios.

➤ *Surveillance par Télédétection*

L'utilisation de la télédétection via des images satellites ou des photos aériennes permet de suivre l'évolution de la surface des retenues et des zones de sédimentation. Ces techniques peuvent être particulièrement utiles pour surveiller de grandes retenues ou pour obtenir des données sur des régions difficilement accessibles.

➤ *Analyse des Apports et des écoulements*

Mesurer les flux entrants et sortants de la retenue peut fournir des informations sur la quantité de sédiments qui y est déposée. Des stations de mesure de débit équipées pour l'analyse des charges en sédiments peuvent être installées aux entrées des retenues.

I.6.2 Mesure de transport solide

L'estimation du transport solide, c'est l'estimation du débit solide. Ce dernier est le volume de matériaux transportés par le courant par unité de temps. Il s'exprime en mètre cube par seconde. De nombreux hydrauliciens ont cherché à établir des relations permettant d'estimer le débit solide d'un cours d'eau, à partir de nombreuses mesures en modèle réduit ou sur des fleuves, différentes formules donnent rarement des résultats comparables, car elles ont été établies dans des conditions différentes.

L'importance de la mesure du transport solide c'est l'estimation de l'afflux de sédiments dans les réservoirs au stade de la planification et de la conception et l'évaluation de l'érosion du sol dans les bassins versant et identification des mesures de conservation. Généralement deux modes de transport solide sont considérées : le transport solide par charriage et le transport solide en suspension. (Zeghmar A, 2023).

▪ *Transport solide par charriage :*

Le charriage concerne plus particulièrement les sables, graviers, galets et blocs. Quand on observe le fond des lits, on constate que le transport des matériaux peut se faire lorsque le débit augmente soit par charriage sur fond plat ou par charriage sur dunes (Fig. I.6). (Degoutte, 2012)

Les mesures sur terrain s'effectuent à l'aide de l'une des appareils suivants : Pièges à sédiments, fosse à sédimentation, Les échantillonneurs à pression différentielle (Helley-Smith, Nile de Delft, BTMA...)

Les mesures sur le terrain du transport solide par charriage sont très onéreuses à cause des perturbations de l'écoulement. De ce fait, les évaluations de ce type de transport sont difficiles à mener en l'absence de bases de données. On se contente généralement d'études sur modèles réduits pour déterminer la proportion du charriage par rapport à la suspension ou au transport total (Couvert, B. 1994 et al. ; Du voisin, J. 1989).

▪ *Transport solide en suspension*

La charge en suspension, constituée de matériaux dont la taille et la densité leurs permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sans toucher le fond du lit. C'est souvent la seule fraction du débit solide qui puisse être mesurée sans trop de difficultés. Fort heureusement, dans la très grande majorité des cas, elle représente quantitativement un pourcentage très important du transport global. La suspension concerne plus particulièrement les argiles, les limons et les sables (Fig. I.6). (Malavoi et al., 2010 ; Nouvelot, 1922).

Les instruments servant à mesurer le transport solide n'ont pas encore fait l'objet d'une uniformisation ou d'une normalisation. Quatre types de préleveurs de MES (matière en suspension) existent : les préleveurs instantanés, les préleveurs par intégration, les préleveurs à pompe.

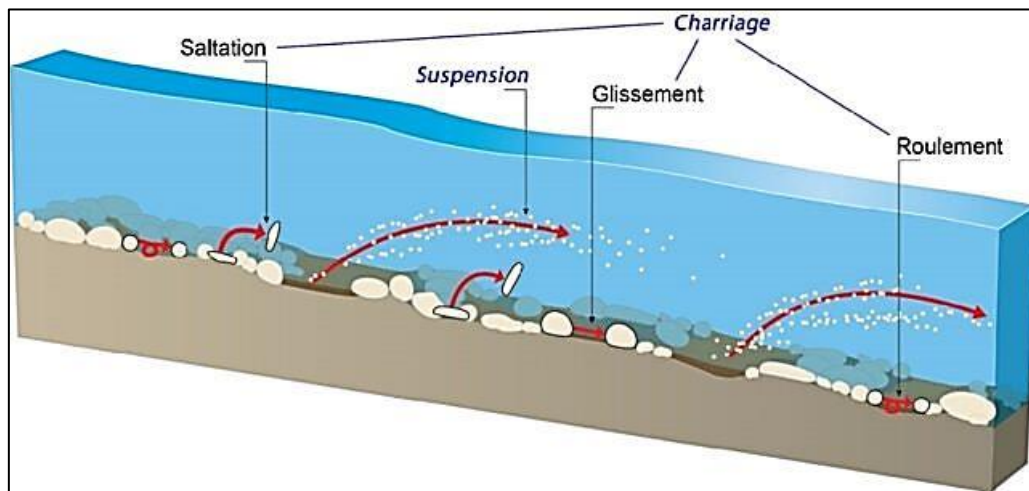


Figure I.6 Modes de transport solide.

(<https://www.bit.ly/45SXz8T>)

I.7 Impact de l'érosion hydrique :

L'impact de l'érosion dépasse largement les limites géographiques de son lieu d'occurrence, car ses conséquences peuvent être ressenties à des échelles régionales, voire globales. L'érosion hydrique, peut avoir des conséquences négatives importantes sur l'environnement, l'économie et la société :

I.7.1 Sur l'environnement

- *Perte de sol et dégradation des terres agricoles*

La perte de sol et la dégradation des terres constituent l'un des impacts les plus visibles et préoccupants de l'érosion. Ce processus, souvent exacerbé par les activités humaines, entraîne des conséquences graves pour la fertilité des sols, la productivité agricole.

- *Effets sur les écosystèmes naturels et la biodiversité*

Outre son impact sur les terres agricoles, la perte de sol affecte également les écosystèmes naturels, entraînant la dégradation des habitats et la perte de biodiversité. Les sols dégradés sont moins capables de soutenir une végétation diversifiée, ce qui peut conduire à la disparition d'espèces végétales et animales. De plus, la diminution de la qualité du sol peut affecter la capacité des écosystèmes à fournir des services écosystémiques essentiels, tels que la filtration de l'eau et la régulation du climat. (<https://www.eaufrance.fr/les-impacts-de-lerosion#:~:text=Outre%20la%20d%C3%A9gradation%20de%20la,parfois%20m%C3%AAme%20%C3%A0%20court%20terme.>)

- *Sédimentation des cours d'eau*

La sédimentation des cours d'eau, résultant de l'érosion des sols terrestres, est un phénomène majeur qui affecte la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes aquatiques. Cette accumulation de sédiments a des répercussions significatives sur la biodiversité, la stabilité des cours d'eau et la capacité des écosystèmes aquatiques à fournir des services écosystémiques vitaux. (Ouvry JF, 2012)

- *Risques d'inondations et de modification des écosystèmes côtiers*

L'accumulation de sédiments dans les cours d'eau augmente le risque d'inondations en réduisant la capacité de stockage d'eau des bassins versants. De plus, les sédiments transportés vers les zones côtières peuvent entraîner la modification des écosystèmes côtiers en comblant les habitats marins, en altérant la dynamique des plages et en affectant la biodiversité des zones intertidales.

- *Pollution de l'eau et des sols*

L'érosion des sols contribue de manière significative à la pollution de l'eau et des sols, en transportant des contaminants tels que des pesticides, des engrais, des métaux lourds et des matières organiques vers les cours d'eau, les lacs et les nappes phréatiques. Cette pollution peut avoir des conséquences graves sur la santé humaine, la biodiversité et la qualité des écosystèmes terrestres et aquatiques. (Ouvry JF, 2012)

- *Contamination des eaux*

Lorsque les sols sont érodés, les contaminants présents à leur surface sont emportés par le ruissellement et le drainage vers les cours d'eau et les plans d'eau environnants. Les pesticides et les fertilisants utilisés en agriculture, les hydrocarbures provenant des routes et des zones urbaines, ainsi que les déchets industriels peuvent tous être transportés vers les eaux de surface, contribuant ainsi à la pollution.

- *Perturbation des habitats et des écosystèmes terrestres*

L'érosion des sols entraîne une perturbation significative des habitats naturels et des écosystèmes terrestres, affectant la biodiversité, la stabilité des écosystèmes et la fourniture de services écosystémiques essentiels.

- *Recul des côtes et perte d'habitats côtiers*

L'érosion côtière provoque un recul progressif des lignes de rivage, entraînant la perte d'habitats naturels tels que les plages, les dunes de sable et les marais salants. Cette perte d'habitats côtiers affecte la biodiversité marine et terrestre, compromettant la survie des espèces qui en dépendent. (Bou Kheir R et al., 2001)

- *Vulnérabilité accrue aux tempêtes et aux phénomènes météorologiques extrêmes*

Les côtes érodées sont plus vulnérables aux tempêtes et aux phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les ouragans, les cyclones et les marées de tempête. Ces événements peuvent causer des inondations côtières, des dommages aux infrastructures et des pertes économiques importantes pour les communautés côtières.

- *Réduction de la capacité de stockage des retenues d'eau*

La sédimentation résultant de l'érosion hydrique peut réduire la capacité de stockage des barrages, des réservoirs et des lacs, limitant ainsi leur efficacité dans la régulation des approvisionnements en eau pour l'irrigation, la consommation humaine, et la production d'énergie hydraulique.

I.7.2 Sur le domaine socio-économique

L'érosion des sols a des répercussions profondes sur les sociétés humaines, affectant les moyens de subsistance, les cultures traditionnelles et les valeurs culturelles des populations vivant dans les zones touchées par ce phénomène. (Bou Kheir R et al., 2001)

- *Pertes économiques dues à la dégradation des terres et à la perte de sol*

L'érosion des sols entraîne des pertes économiques importantes en réduisant la productivité des terres agricoles, en diminuant les rendements des cultures et en augmentant les coûts de production. Les agriculteurs et les communautés rurales dépendantes de l'agriculture sont particulièrement touchés par cette diminution des revenus, ce qui peut entraîner une pauvreté accrue et une insécurité alimentaire.

- *Répercussions sur les moyens de subsistance des populations rurales*

Les populations rurales dépendent souvent des ressources naturelles pour leur subsistance, notamment de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche. L'érosion des sols compromet ces moyens de subsistance en réduisant la disponibilité des terres arables, en dégradant les pâturages et en affectant les habitats aquatiques. Cela peut entraîner une migration forcée, une perte de cultures traditionnelles et une détérioration du bien-être économique des populations rurales. (Bou Kheir R et al., 2001)

- *Coûts économiques*

L'érosion hydrique engendre des coûts économiques significatifs liés à la perte de productivité agricole, au nettoyage des sédiments dans les voies navigables et les infrastructures hydrauliques, à la restauration des terrains érodés, et à la gestion des impacts environnementaux.

- *Impacts sociaux*

Les communautés dépendant de l'agriculture peuvent subir des pertes économiques graves dues à la réduction de la fertilité des sols, affectant la sécurité alimentaire et augmentant la vulnérabilité à la pauvreté. Les conflits peuvent également émerger autour de l'utilisation des ressources en eau affectées par la sédimentation et la pollution. (<https://openknowledge.fao.org/home>)

Conclusion

L'érosion des sols est un élément important à prendre en considération dans la planification du développement et du fonctionnement des bassins. Il réduit non seulement la capacité de stockage du réservoir en aval mais aussi se détériore la productivité du bassin hydrographique. L'érosion concerne le détachement, le transport et le dépôt de particules de sol.

Le transport des sédiments est la quantité totale de matière érodée pour être délivrés de sa source jusqu'à un point de contrôle en aval. Les agents de l'érosion hydrique considérés

comme les plus efficaces sont la pluie et les écoulements. Le phénomène de l'érosion hydrique commence avec l'impact de la goutte de pluie initiale, cela occasionne de nombreux dégâts environnementaux et aura de grosses répercussions sur l'écosystème du bassin versant.

L'érosion, qu'elle soit causée par les forces naturelles ou exacerbée par les activités humaines, représente un défi majeur pour la santé des écosystèmes terrestres et aquatiques, ainsi que pour la durabilité des sociétés humaines. Au fil de ce texte, nous avons exploré en profondeur les multiples facettes de l'érosion, mettant en lumière ses impacts sur les sols, les cours d'eau, les écosystèmes, les communautés côtières et les cultures locales.

Face à ces défis, il est impératif d'adopter une approche holistique de la gestion des terres et des ressources naturelles, qui intègre les dimensions sociales, économiques, environnementales et culturelles du problème. Cela nécessite une collaboration étroite entre les gouvernements, les organisations de la société civile, les communautés locales et les experts en développement pour mettre en œuvre des stratégies de conservation des sols, de restauration des écosystèmes et de promotion de pratiques agricoles durables.

Chapitre II

CHAPITRE II : ENVASEMENT DES BARRAGES

Introduction :

Le phénomène d'envasement est la conséquence directe des processus d'érosion hydrique et des transports solides qui se manifestent à la fois à l'amont de la retenue et au niveau du bassin versant, c'est un problème majeur qui affecte leur efficacité et leur durabilité. Il se réfère à l'accumulation de sédiments transportés par l'eau qui se dépose au fond du réservoir du barrage. Cela peut réduire la capacité de stockage de l'eau, diminuer l'efficacité de la production hydroélectrique, augmenter les risques d'inondation en amont, et exiger des opérations de maintenance coûteuses.

Dans de nombreux pays du monde, le transport des sédiments dans le réseau hydrographique des bassins versants et leur dépôt dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans la retenue mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui bien souvent exige que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays arides et semi-arides comme l'Algérie. Dans l'un et l'autre cas, il en résulte des dommages considérables à l'environnement et une mise en péril de l'économie du projet.

II.1 Origine et définition de l'envasement

L'envasement des barrages provient principalement de l'érosion des sols dans les bassins versants, du transport des sédiments lors des crues (Che Nde S et al., 2019 ; Remini B, 2016). L'érosion des bassins versants contribue à l'accumulation de boue et de terre dans les barrages, en particulier lors des inondations, ce qui entraîne un envasement (Fig.II.1) (Baade J, 2022).

L'origine de l'envasement se trouve dans le dépôt de particules solides, minérales et organiques sur le lit du cours d'eau. Elles sont transportées, par charriage, saltation ou en suspension, pour se déposer dès que le débit du cours d'eau faiblit. (<http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/289/1/ETUDE-ET-VALORISATION-DES-SEDIMENTS-DE-DRAGAGE-DU-BARRAGE-BAKHADDA-TIARET.pdf>)

Qu'est-ce qu'une vase ? Le nom de vase (mot emprunté au Néerlandais) est la désignation d'une large famille de sédiments fins, argileux, plus ou moins organiques, pouvant atteindre des teneurs en eau importantes. Elles contiennent une phase minérale dont la granulométrie s'étend des sables, aux argiles et aux colloïdes, une phase organique et une phase liquide. La vase peut se présenter aussi bien à l'état de suspension (crème de vase) que de sol cohérent (sédiment cohésif) présentant alors un caractère plastique, compressible et thixotropique. Elle contient souvent l'habitat d'une faune riche et diversifiée (vers, mollusques, bactéries).

(https://m.facebook.com/anbt.communication/photos/a.576689372701326/746007272436201/?type=3&locale=hr_HR)

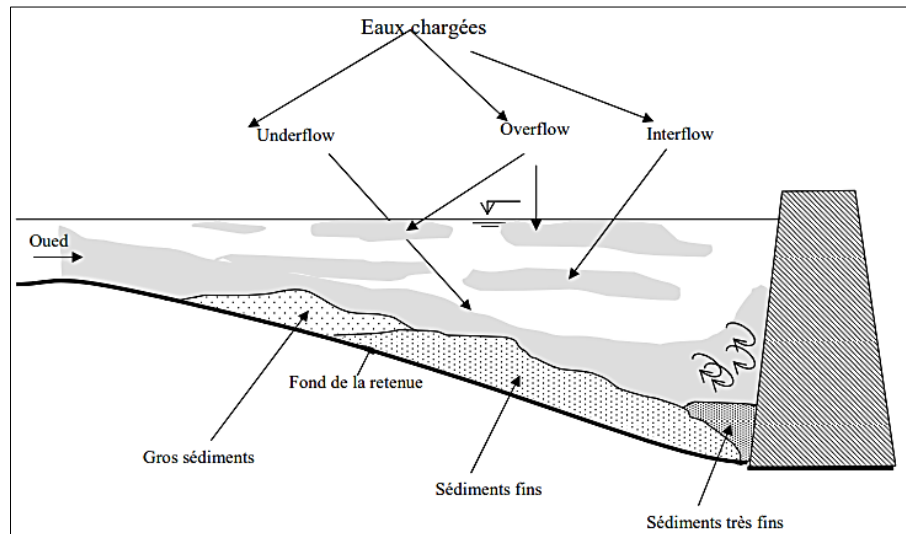


Figure II.1 Dépôt de vase. (Banaicha A ,2011)

II.2 Processus et étapes de l'envasement

L'envasement est le processus par lequel des sédiments sont transportés et déposés dans un milieu aquatique, tel qu'un lac, une rivière, ou un réservoir. Ce phénomène peut entraîner la réduction du volume d'eau, affectant ainsi la faune, la flore, et les usages humains comme l'hydroélectricité ou l'irrigation.

Les principales étapes du processus d'envasement sont (Fig. II.2) :

II.2.1 Érosion des sols :

L'envasement commence souvent par l'érosion des sols dans le bassin versant. Cette érosion peut être naturelle (causée par le vent, l'eau, le gel, etc.) ou exacerbée par des activités humaines telles que le défrichement, l'agriculture, et l'urbanisation. Les particules de sol sont détachées de leur emplacement d'origine.

II.2.2 Transport des sédiments :

Une fois détachées, les particules de sol sont transportées par l'eau de ruissellement. Le mode de transport dépend de la taille des particules : les plus fines peuvent être maintenues en suspension dans l'eau, tandis que les plus lourdes roulent ou glissent le long du fond (charriage).

II.2.3 Dépôt des sédiments :

Lorsque la vitesse de l'eau diminue, les particules en suspension commencent à se déposer. Cela se produit souvent là où la rivière entre dans un plan d'eau plus calme, comme à l'embouchure ou dans les réservoirs derrière les barrages. Les particules les plus lourdes se déposent en premier, suivies par les plus légères.

II.2.4 Accumulation :

Au fil du temps, les sédiments continuent de s'accumuler, formant de nouvelles couches sur le fond du plan d'eau. Cette accumulation peut progressivement remplir le bassin et réduire sa capacité.

II.2.4 Tassement :

Au cours du tassement la vase présentera des états physiques très différents suivant son « âge » ou plus exactement sa teneur en eau. Liquide lorsqu'elle renfermera de l'eau interstitielle en quantité notable, elle deviendra plastique lorsque les liaisons inter particulaires se feront par l'eau de la double couche adsorbée et atteindra l'état solide lorsque les particules seront en contact les unes avec les autres.

Les conditions de tassement sous l'eau de ces vases dépendent de nombreux paramètres dont la taille des particules élémentaires qui forment la, suspension, la nature des eaux associées, la température, les conditions de drainage, l'épaisseur du dépôt, sa concentration initiale, le rythme de sédimentation, les pourcentages d'éléments silteux ou sableux, etc (Migniot C, 1989)

II.2.5 Consolidation

Pour des matériaux à perméabilité moyenne ou forte, il y aura une consolidation rapide voire instantanée. C'est le cas des matériaux sableux ou graveleux. Par contre pour des matériaux à faible perméabilité, tels que les sables vaseux, les vases ou les boues, la consolidation des dépôts sera très lente et l'on aura à faire à des sols cohérents.

Lorsque l'on étudie les conditions de consolidation des vases d'un site géographique déterminé, il est donc nécessaire de s'assurer qu'il existe une certaine homogénéité dans les dépôts et que des pourcentages variables de silts, ou d'autres matériaux, ne viennent pas modifier dans de fortes proportions les conditions de consolidation des dépôts. (Migniot C, 1989)

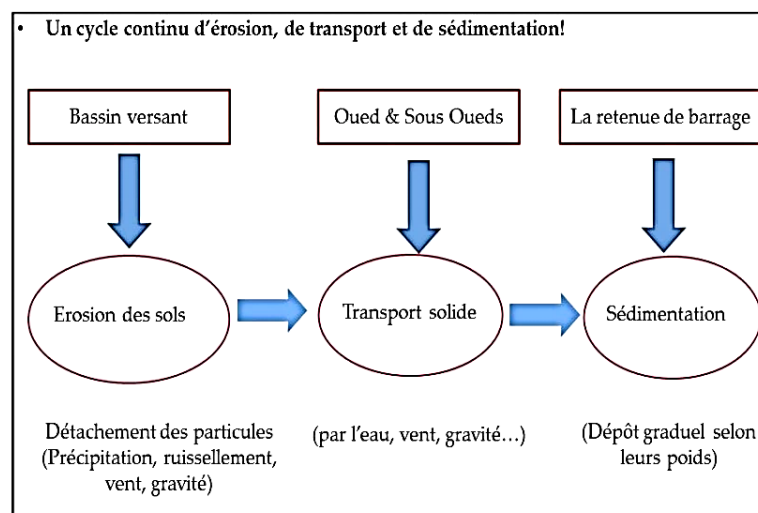


Figure II.2 Processus de l'envasement des barrages. (Migniot C, 1989)

II.3 Les facteurs influencent sur l'envasement des retenues

Un réservoir s'envasera d'autant plus rapidement que sa capacité faible vis à vis du débit solide, apporté par le cours d'eau qui alimente le réservoir, étant dans une région déterminée approximativement proportionnel au débit liquide lui-même est relié à la superficie du bassin versant par une loi linéaire. (Benaicha A, 2011)

Il est nécessaire de caractériser un réservoir par sa capacité (spécifique) en m^3/km^2 du bassin versant. Les apports solides venant de l'amont sont fonction essentiellement :

- De la surface de la topographique et de la nature géologique du bassin versant ;
- Du régime des pluies et de la température ;
- De la résistance à l'érosion du sol, liée à sa teneur en eau et à son couvert végétal (forêt, pâturages, culture).
- De l'activité humaine, comme les activités de construction, décharges et gestion des déchets...etc.

II.4 Les méthodes d'estimation de la vase

Toute retenue est destinée à long terme au comblement, à moins que la réserve utile ne soit préservée par des mesures appropriées. Au stade de l'étude préliminaire, il est essentiel d'estimer la vie utile d'une retenue. La vie utile est la durée de temps entre son inauguration et le moment où le comblement empêche le fonctionnement prévu pour la retenue à sa conception. (Bruk. S, 1986)

La quantification de l'érosion fait appel à de nombreuses méthodes mises au point à travers le monde et qui se résument comme suit :

II.4.1 Méthodes directes :

L'accumulation des sédiments véhiculés par les eaux pluviales et venantes se déposer dans la cuvette des barrages, constitue une préoccupation essentielle pour les méthodes d'évaluation du volume des vases. On distingue les méthodes de mesures suivantes (Boubakeur M et Lakhal R, 2021) :

➤ *Méthode de bathymétrie :*

- **Bathymétrie par nivellement** : Elle permet soit de mesurer simplement la hauteur totale de vase par enfoncement, soit de mesurer la hauteur d'eau avant et après les travaux, une résistance plus soutenue permet d'apprécier le haut du substrat, les mesures sont composées de profils en travers qui pour être représentatif, doivent être judicieusement localisés et dénombrés. La définition du volume extrait ou à retirer est établie par exploitation entre deux profils à partir du produit entre la section envasée et la distance (Fig.II.3). (Boubakeur M et Lakhal R, 2021)

- **Bathymétrie par sondeurs :** Le dernier appareil a mesuré la profondeur par échosondeur, une véritable révolution dans la mesure de l'eau profonde. Cette sonde de l'écho, le type moderne a été inventé pour la première fois dans les années de la première guerre mondiale sur les sites physicien français angevin. Les mesures bathymétriques permettent de suivre l'évolution du volume des sédiments accumule (Fig.II.4). (Boubakeur M et Lakhal R, 2021)

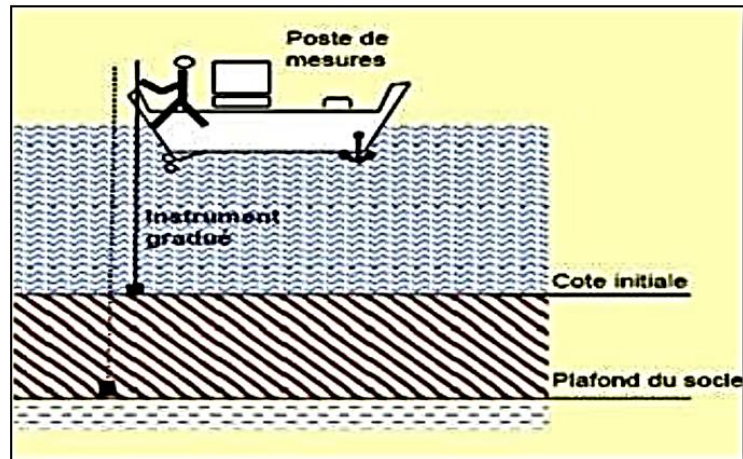


Figure II.3 Bathymétrie par nivellement. (Boubakeur M et Lakhal R, 2021)

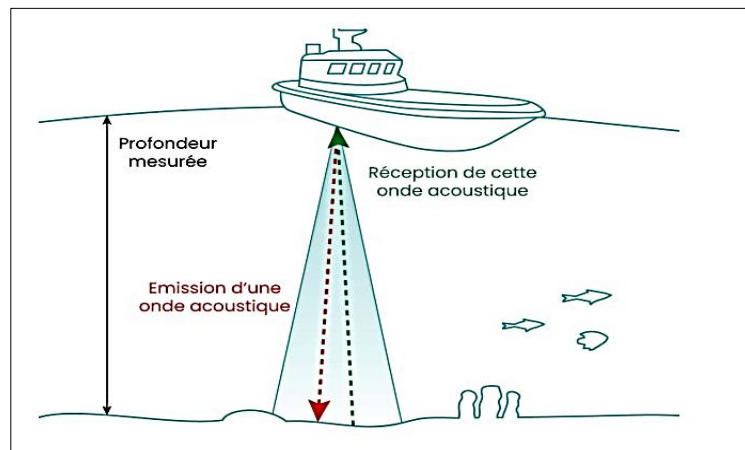


Figure II.4 Bathymétrie par échosondeur. (Boubakeur M et Lakhal R, 2021)

➤ *Mesure à l'amont de la retenue (dans les rivières) :*

La meilleure façon d'obtenir une mesure exacte de la quantité de matériaux solides apportés dans le lac par une rivière est de mesurer le débit et la concentration en matériaux solides de la rivière entrante à l'amont de la retenue. Pour faciliter les mesures, les matériaux solides transportés par une rivière sont habituellement classés en deux catégories :

a) Les matériaux fins, ayant un diamètre inférieur à 0,062 mm ;

b) Les matériaux grossiers ayant un diamètre supérieur à 0,062mm, ces derniers peuvent être divisés à leur tour en deux catégories, les matériaux en suspension et les matériaux charriés. (Bruk. S, 1986)

Le débit solide total d'une rivière est la somme de trois éléments : les matériaux fins en suspension et les matériaux grossiers charriés. A cause des différents types de circulation de chaque catégorie, il n'existe aucun appareil capable de mesurer le débit solide total en un point naturel donné.

II.4.1.1 Mesure de charriage :

✓ Les bassins et fosses de sédimentation :

On peut classer dans cette catégorie les aménagements mettant à profit (souvent à l'aide d'un ouvrage de génie civil) la capacité de sédimentation du cours d'eau, sur tout où une partie de sa section. Le mécanisme de dépôt, efficace, résulte en général de l'élargissement du lit étalement de la lame d'eau) et d'une rupture de la pente d'énergie. On retrouvera dans cette catégorie les fosses d'extractions, les barrages, et les plages de dépôts (Fig. II.5).

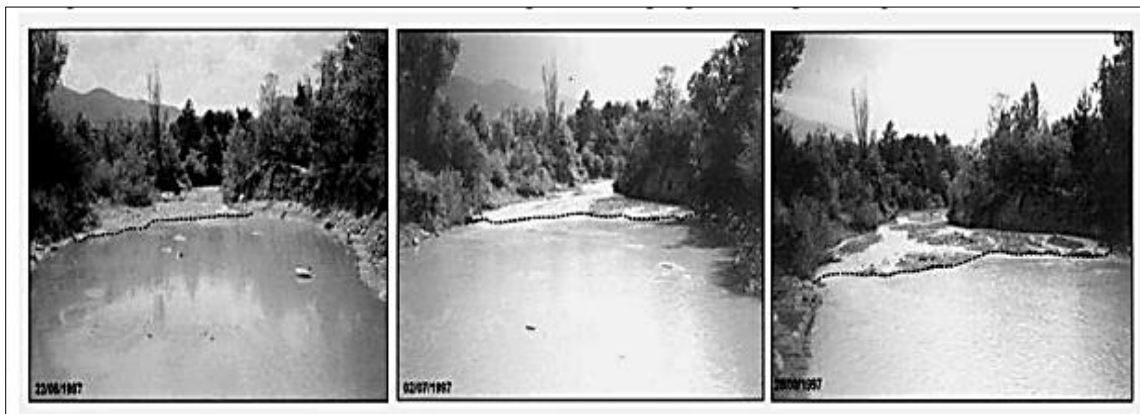


Figure II.5 Remplissage d'une ancienne fosse d'extraction sur la rivière de l'Esconavette, France

(<https://www.bedloadweb.com/Mesure%20du%20charriage.pdf>)

✓ Piège à sédiment :

Les pièges sont constitués d'une poche de grillage montée sur un cadre métallique qui laisse passer les matières en suspension, mais retient les matériaux grossiers. La taille inférieure des matériaux retenus correspond à la dimension des mailles du grillage, la taille supérieure à celle de l'ouverture du dispositif (Fig.II.6).(Recking, 2012; Peters, 2009).

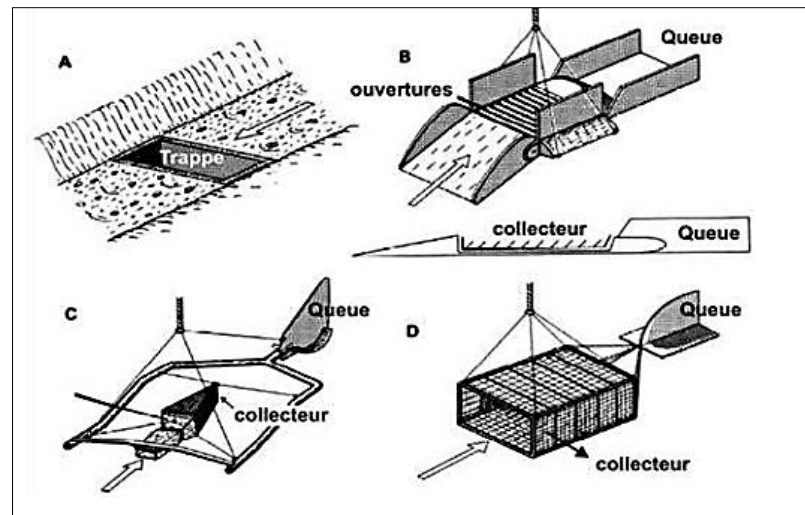


Figure II.6 Pièges à sédiment (Recking, 2017).

✓ Les échantillonneurs à pression différentielle :

Le principe est relativement simple et consiste à donner à la structure une forme divergente (dans le sens de l'écoulement), qui en déviant les lignes d'eau, crée une dépression sur la face arrière du préleveur, venant compenser la perte de charge précédemment décrite. L'objectif recherché est bien sûr d'obtenir une vitesse en entrée de dispositif égale à la vitesse du fluide ambiant. Le rapport entre ces deux vitesses définit l'efficacité hydraulique du préleveur (Recking, 2012; Peters, 2009)

De nombreux modèles ont été développés, avec des structures plus ou moins complexes, avec ou sans filet. On cite les préleveurs suivants (Fig. II.7): *Helley-Smith*, L'Arnhem BTMA (*Bedload Transport Meter Arnhem*), *Nile de Delft*....etc

Tous ces appareils demandent à être testés en laboratoire afin d'évaluer leur efficacité. Le rapport du débit solide mesuré au débit solide réel est déterminé dans un canal d'expérimentation ; on l'appelle *coefficient d'efficacité* de l'appareil. Même dans ces conditions, ce rapport est délicat à déterminer, car il varie notamment avec la composition granulométrique des matériaux et avec le degré de remplissage du préleveur.

D'après Emmett (1980), les différents types d'appareils ont les *coefficients d'efficacité* suivants :

- Piège de type *Helley-Smith*, presque 100 % ;
- Pièges à sédiment, environ 45 % ;
- Appareils à dépression, environ 70 %.

Ces résultats correspondent toutefois à des conditions très précises d'utilisation

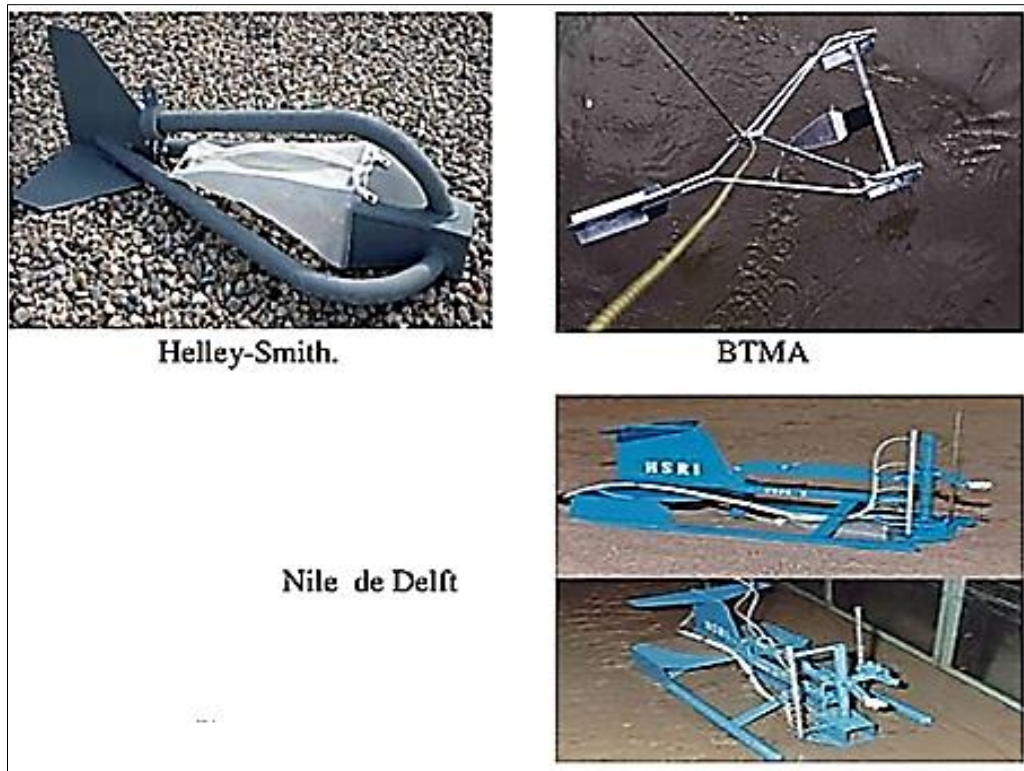


Figure II.7 Différents types de préleveurs de charriage.

II.4.1.2 Mesure de la suspension :

✓ *Appareils de mesure de la suspension* : Quatre types de préleveurs de MES existent (Fig. II.8) :

- Les préleveurs instantanés ;
- Les préleveurs par intégration ;
- Les préleveurs à pompe ;
- Les pièges à sédiments ou sédimento-mètres.

(A ces quatre méthodes par prélèvement ou piégeage s'ajoute la *mesure directe de turbidité en continu*).

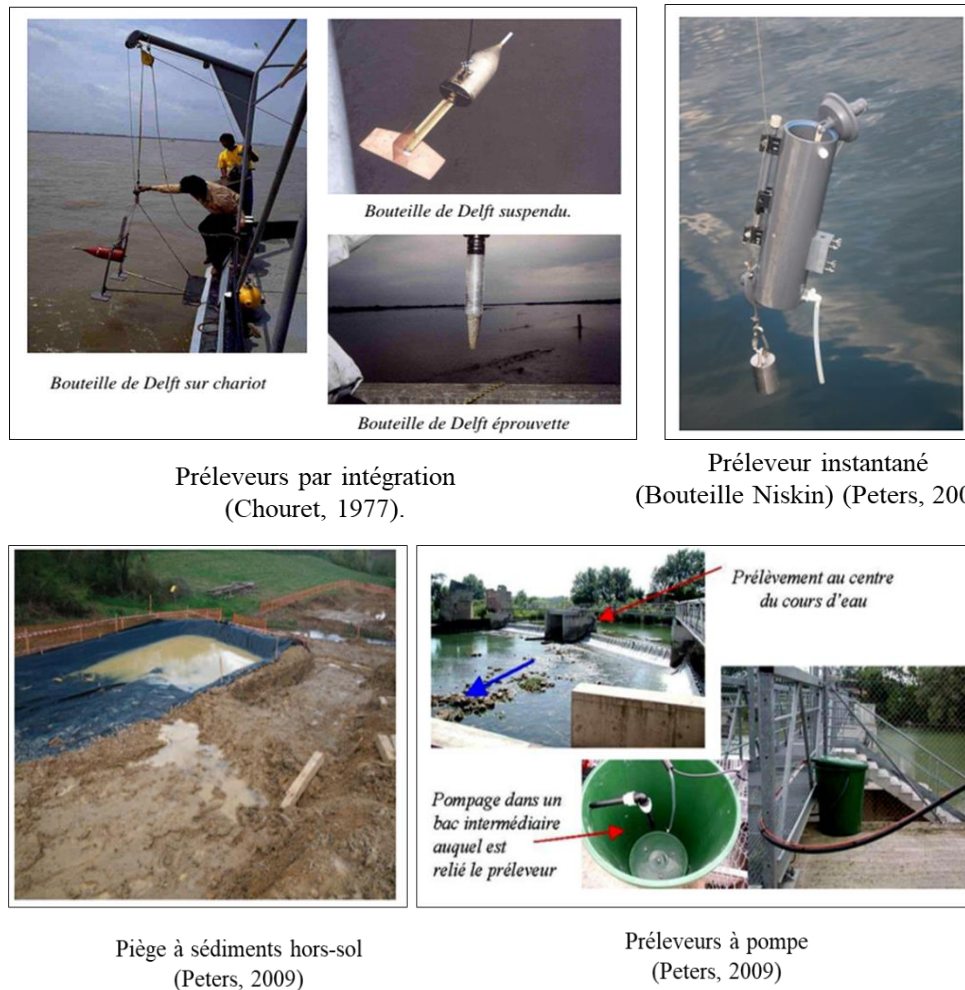


Figure II.8 Différents types de préleveurs en suspension.

II.4.2 Méthodes indirectes :

➤ La télédétection :

L'estimation de l'envasement par télédétection fait appel à diverses méthodes et technologies. Des études ont démontré l'efficacité de l'utilisation de différentes techniques de télédétection à cette fin. Par exemple, l'utilisation des données ASTER combinées à l'analyse spectrale a permis de cartographier avec succès l'envasement des barrages (Rajendran S et al., 2020) . En outre, le développement de véhicules aériens sans pilote équipés de caméras spécialisées a permis de surveiller l'envasement dans les réservoirs avec une haute résolution spatiale et temporelle, aidant à identifier les sources de sédiments et soutenant les stratégies d'atténuation (Febles Diaz, JM et al., 2022). Ces avancées dans les technologies de télédétection offrent des moyens précis, rentables et efficaces d'estimer et de surveiller l'envasement des plans d'eau.

Les améliorations technologiques récentes de la photogrammétrie ont réduit le coût de cette méthode par rapport aux études hydrographiques traditionnelles. L'U.S. Bureau of Reclamation estime que cette méthode est la plus rentable, à condition de pouvoir abaisser la retenue de façon importante. (Bruk. S, 1986)

➤ *Modélisation de l'érosion par SIG (USLE, MUSLE ou RUSLE).*

La modélisation de l'envasement à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG) peut être réalisée efficacement grâce à l'application de divers modèles d'érosion des sols tels que l'équation universelle de perte de sol (USLE), l'USLE modifiée (MUSLE) ou l'USLE révisée (RUSLE). Ces modèles utilisent des facteurs tels que les précipitations, les types de sols, la pente et la couverture végétale pour prédire le potentiel d'érosion du sol (Tiwari et al., 2021). L'intégration de la télédétection aux SIG s'est également révélée utile pour déterminer les vulnérabilités à l'érosion des sols à l'aide du modèle RUSLE, démontrant ainsi son efficacité dans les études de gestion des bassins versants. Par conséquent, l'utilisation de l'USLE, du MUSLE ou de la RUSLE en conjonction avec les SIG peut fournir des informations précieuses pour la modélisation des processus d'envasement dans divers paysages. (Nikolaos E et al., 2020)

II.5 Problèmes imposés par l'envasement

Parmi les principaux problèmes imposés par l'envasement :

- Réduction de la capacité de stockage d'eau ;
- Impact sur l'habitat aquatique ;
- Navigation et transport ;
- Contamination des eaux ;
- Risques d'inondation ;
- Coûts de dévasement élevé ;
- Impact négatif sur le tourisme

II.6 Conséquences de l'envasement

Parfois l'envasement des barrages est lié à des erreurs commises par les organismes responsables de l'étude du projet et/ou de sa réalisation et/ou enfin de la gestion de l'ouvrage au cours d'exploitation. Ces erreurs dites techniques peuvent être énumérées comme suit (Boubakeur M et Lakhal R, 2021) :

- Mauvaise évaluation du problème de l'envasement avant la construction du barrage, pouvant être le résultat de plusieurs facteurs, tels que : l'utilisation de modèles empiriques statiques ou établis dans des conditions différentes de celles du site étudié, le manque d'élaboration de modèles de prévision et l'exploitation de fausses données, résultats des fausses mesures....etc ;
- Mauvaise exploitation et implantation des ouvrages annexes à cause de l'ignorance du mécanisme des courants de densité, le mode d'écoulement de cette vase dépend de sa

rigidité qui varie avec la nature des sédiments et leur temps de séjour dans la retenue, et dont la connaissance permet d'optimiser les manœuvres des ouvrages de soutirage...etc

II.7 Valorisation de la vase

La valorisation de la vase, ou des sédiments extraits lors du dragage, des réservoirs, représente une alternative intéressante pour réduire les impacts environnementaux associés à l'envasement et pour transformer un déchet potentiel en ressource. (Baade J, 2022).

- Agriculture et amélioration des sols (utilisée comme amendement pour les sols agricoles) ;
- Création de substrats de culture ;
- Restauration des habitats ;
- Création de zones humides ;
- Renforcement des berges ;
- Matériaux de construction comme la fabrication des briques et de blocs ;
- Production de ciment ou de béton ;
- Production de biogaz utilisé comme un digesteur anaérobie pour produire du biogaz, une source d'énergie renouvelable ;
- Activités de remblayage.

II.8 Statistique sur l'envasement des barrages en Algérie.

À l'échelle nationale, le problème est largement répandu. Le premier barrage construit en Algérie est celui de Sig (Mascara) en 1846, il a été abandonné faute de son envasement rapide. En 1890, il existait en Algérie neuf barrages d'une capacité de 61 Millions de m³ avec un volume de vase de 2,7 Millions. Aujourd'hui, l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (A.N.B.T), estime que sur 65 grands barrages en exploitation d'une capacité de stockage de 7.69 milliards m³, l'envasement est d'environ 1.11 milliards m³ (Fig. II.9). La première cause est l'érosion des bassins versants (plus de 1000 t/km²/an), ce qui correspond à un taux d'envasement annuel près de 14.43 %, avec une perte annuelle de 2 à 3% de la capacité de stockage (Tableau II.1). À titre d'exemple, la capacité initiale du barrage Djorf Torba (Béchar) était de 350 hm³ en 1969, elle n'était plus que de 260 hm³ en 2004. Une projection a été faite pour l'an 2010, d'où il ressort que certains barrages comme par exemple ceux de Fergoug (Mascara) et de Bakhadda (Tiaret) finiront par périr si des dispositions radicales ne sont pas prises (Fig. II.10). (Bellaout F, 2021)

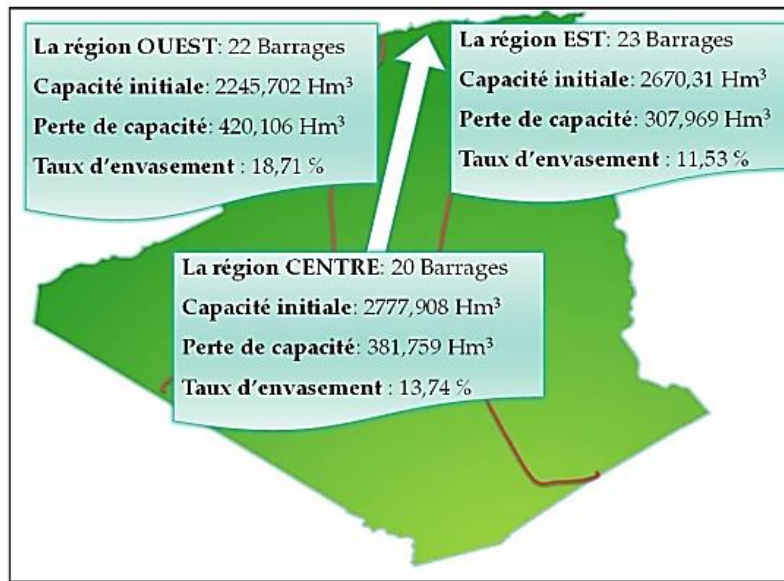


Figure II.9 État des barrages en Algérie (source A.N.B.T, 2004-2014).

Tableau II-1 : Évolution de la situation des barrages Algériens (Source : A.N.B.T)

En 1962

Nombre	Capacité initiale (Hm ³)	Capacité en 2004 (Hm ³)	Volume vase (Hm ³)	Envasement (%)
14	826	530	296	35,8

En 2000

Nombre	Capacité initiale (Hm ³)	Capacité en 2004 (Hm ³)	Volume vase (Hm ³)	Envasement (%)
45	3.939,00	3 452,00	487,00	12,3

En 2014

Nombre	Capacité initiale (Hm ³)	Capacité en 2004 (Hm ³)	Volume vase (Hm ³)	Envasement (%)
68	7 751,00	6736,00	1015,00	13%



Figure II.10 État d'envasement des barrages Fergoug et Bakhadda en 2008.

II.9 Lutte contre l'envasement

L'Algérie compte un nombre important de barrages de toutes catégories et de toutes dimensions, destinés à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable ou industrielle. Malheureusement, ce potentiel de richesse se dégrade de jour en jour par l'envasement des barrages. Il s'agit d'un problème qui n'est pas propre à l'Algérie, mais qui se pose partout. Face à ce problème, les services hydrauliques ont déployés d'énormes efforts depuis plusieurs années. Ainsi, différents moyens techniques de lutte ont été expérimentés en Algérie, ce qui a donné comme résultats le prolongement de la durée de vie de plusieurs barrages (Bellaout F, 2021). On divise les techniques de lutte contre l'envasement en deux (2) grandes phases, l'un indirecte pendant la phase d'élaboration du projet par les méthodes préventives, et l'autre directe pendant la phase d'exploitation par les méthodes curatives (Fig. II.11)

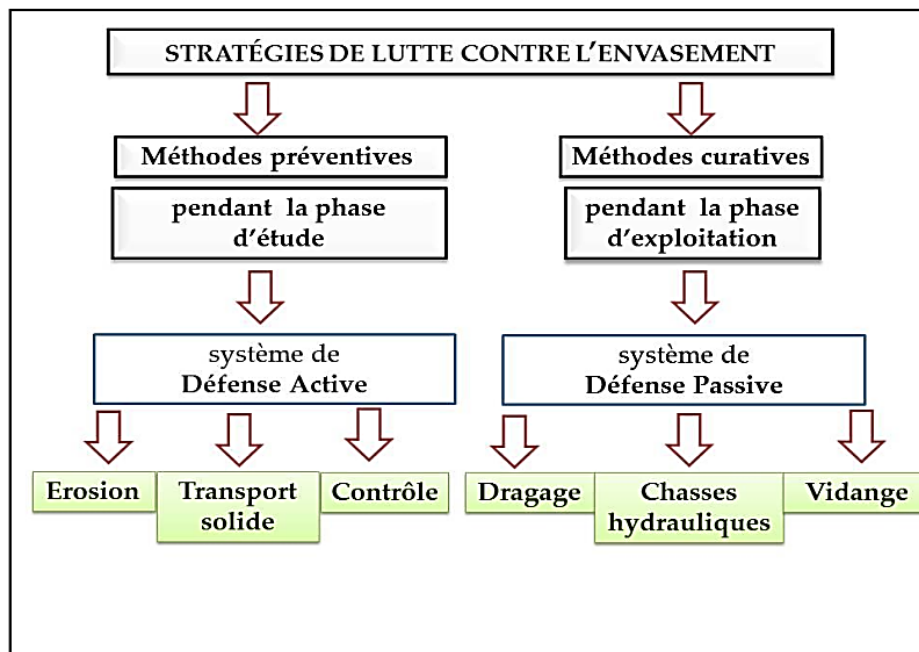


Figure II.11 Techniques de lutte contre l'envasement. (Bellaout F, 2021)

II.9.1 Méthodes préventives :

La première idée qui vient à l'esprit pour réduire l'envasement, est celle qui consiste à empêcher la formation des sédiments produits par l'érosion. Cette solution doit prendre en considération l'aménagement des bassins versants (Fig.II.12).

À titre d'exemple, on peut citer quelques méthodes utilisées en Algérie ; le reboisement, la formation des banquettes pour freiner l'écoulement torrentiel, la création de petits barrages en gabions dans les petits thalwegs, la plantation des cultures suivant les courbes de niveau et la plantation de végétation à longues tiges dans les oueds. Dans ce cadre de la protection des bassins versants des barrages, et selon l'ANBT, un programme spécial a été lancé par la Direction Générale des forêts. Il s'agira de traiter une superficie de 1,5 Millions d'hectares entre 2014 et 2020. (Bellaout F, 2021)



Seuil



Terrassement.



Correction torrentielle



Enherbement

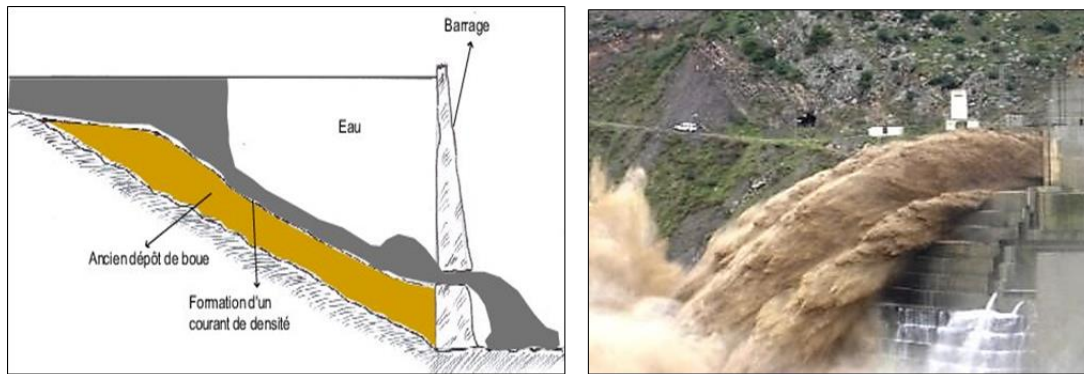
Figure II.12 Quelques techniques préventives. (Bellaout F, 2021)

II.9.2 Méthodes curatives :

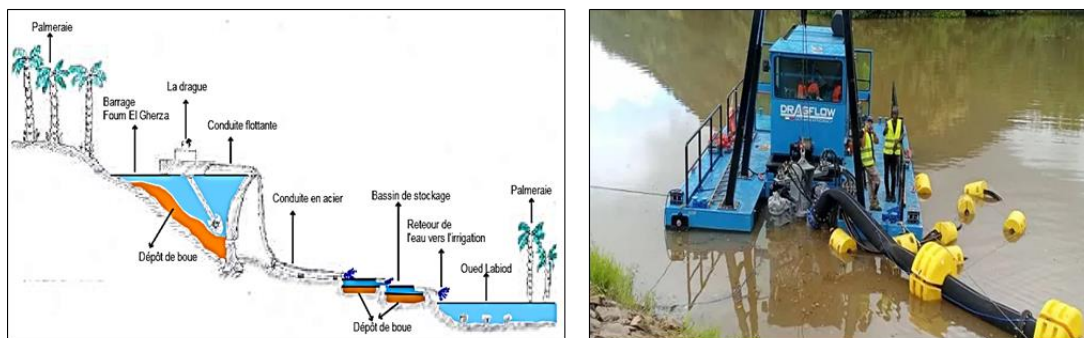
- Les chasses de dévasement par les vidanges de fond à barrage plein et au moment de l'entrée d'un excédent d'eau dans la retenue. Cette méthode est utilisée sur la plupart des barrages Algériens, leurs efficacités se limitent à éviter le blocage des vannes (Fig. II.13). (Bellaout F, 2021)
- Le dévasement par dragage est devenu aujourd'hui une option inévitable pour prolonger leur durée de vie (Fig. II.13). Deux modes peuvent être opérés au niveau d'un barrage. Il s'agit :
 - D'un dévasement périodique (évacuation de la vase par la vanne de fond) ;
 - D'un dévasement occasionnel (dragage d'un barrage).

Actuellement selon l'ANBT, huit barrages sont en cours de dévasement par dragage. Il s'agit du barrage Foum El Kherza (Biskra), K'sob (M'sila), Zardezas (Skikda), Sidi Abdelli (Relizane), Bouhanifia et Fergoug (Mascara), BenKhedda (Tiaret) et Djorf- Torba (Béchar). Le coût de ces opérations est de l'ordre de 9 milliards de DA.

Le dévasement par dragage est une opération très coûteuse et qui pose un problème complexe relatif au rejet de la vase draguée.



Dévasement par Vidange de fond



Dévasement par dragage

Figure II.13 Techniques curatives. (Remini, 2019)

Conclusion

L'envasement des barrages est un phénomène naturel qui pose des défis significatifs à la gestion et à l'opération durable des infrastructures hydrauliques. L'accumulation de sédiments dans les réservoirs de barrages réduit leur capacité de stockage d'eau, affecte leur fonctionnement et leur efficacité, et peut même compromettre leur sécurité structurelle. Comprendre les techniques de mesure et de protection contre l'envasement est donc décisif pour la gestion des ressources en eau.

L'envasement des barrages est un problème complexe qui nécessite une approche intégrée englobant la surveillance, la gestion proactive du bassin versant (techniques préventives), et des interventions techniques directes (techniques curatives, curage, dragage). Une planification et une gestion efficaces peuvent prolonger significativement la durée de vie utile des barrages et maintenir leur fonctionnalité pour répondre aux besoins en eau et en énergie des populations.

Chapitre III

CHAPITRE III : TECHNIQUE DE LA BATHYMÉTRIE DANS LE DOMAINE DES BARRAGES

Introduction :

Les barrages, symboles de l'ingénierie hydraulique, jouent un rôle capital dans la gestion des ressources en eau, offrant une multitude d'avantages tels que la régulation des cours d'eau, la production d'électricité, l'irrigation agricole et la fourniture d'eau potable. Cependant, malgré ces avantages indéniables, les barrages ne sont pas à l'abri d'un problème majeur : l'accumulation de vase ou de sédiments dans leurs réservoirs. Cette accumulation, connue sous le nom d'envasement, peut entraîner une réduction de la capacité de stockage, une détérioration de la qualité de l'eau et des impacts environnementaux et économiques significatifs quand déjà les énoncés au chapitre précédent.

Ce chapitre vise à explorer en profondeur l'utilisation de la bathymétrie pour l'estimation de la vase dans les réservoirs des barrages, nous allons examiner les différentes méthodes et technologies utilisées pour collecter des données bathymétriques, analyser et interpréter ces données pour obtenir des informations précises sur l'envasement, et explorer les applications pratiques de ces informations dans la gestion des sédiments dans les barrages. En mettant en lumière les avantages, les défis et les perspectives futures de cette approche innovante, nous espérons fournir un aperçu complet de son potentiel pour transformer la gestion des ressources en eau et assurer une utilisation durable des barrages et de leurs réservoirs.

III.1 Principes de base de la bathymétrie

III.1.1 Définition

La bathymétrie (du grec bathys, « profond » et mètre, « mesure ») est la science de la mesure des profondeurs et du relief de l'océan. Il s'agit donc de déterminer la topographie de la mer, comme le ferait un géomètre pour le relief terrestre.

La bathymétrie consiste en la mesure de la profondeur d'un plan d'eau (par exp retenues d'un barrage) par sondage et traitement des données correspondantes en vue de déterminer la configuration du fond. Elle utilise diverses techniques de cartographie et de mesure, telles que les sonars, les échosondeurs, les lidars et les satellites, pour obtenir des données sur la structure sous-marine ou subaquatique. (<https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/4170/bathymetrie>)

III.1.2 Objectifs :

L'objectif principal de la bathymétrie est de créer des cartes du fond marin ou des lits lacustres, appelées cartes bathymétriques. Ces cartes sont très utilisables pour diverses applications et domaines comme la géologie, l'hydrologie, l'océanographie, la géographie physique et la sédimentologie, et joue un rôle essentiel dans de nombreux domaines,

notamment la navigation, l'exploration des ressources naturelles, la construction, l'ingénierie la gestion de l'environnement sous-marine et l'archéologie sous-marine...

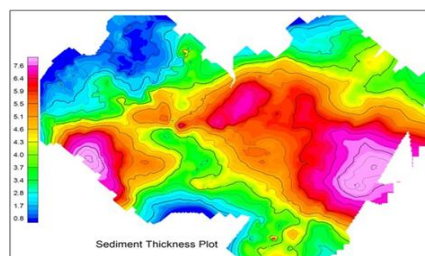
III.2 Applications de la bathymétrie dans le domaine des ressources en eau

La bathymétrie joue un rôle central dans la gestion intégrée des ressources en eau, en fournissant des informations précieuses sur la topographie sous-marine, la quantité et la qualité de l'eau, les processus géomorphologiques et les écosystèmes aquatiques. Ces informations sont essentielles pour une gestion durable des ressources en eau, la préservation de l'environnement aquatique et la sécurité des populations.

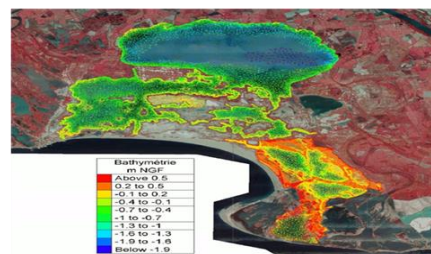
III.2.1. Cartographie des lits de rivières : La bathymétrie permet de cartographier précisément les fonds marins et les lits de rivières, fournissant des informations détaillées sur la topographie sous-marine. Cette cartographie est essentielle pour comprendre la morphologie des bassins versants, l'évolution des habitats aquatiques et les processus géologiques et géomorphologiques qui influent sur la distribution et la qualité de l'eau.

III.2.2. Modélisation des courants et des flux hydrauliques : En combinant les données bathymétriques avec des données hydrologiques et météorologiques, il est possible de modéliser les courants et les flux hydrauliques dans les plans d'eau. Cette modélisation permet de prédire les mouvements de l'eau, de comprendre les dynamiques de transport des contaminants et de planifier les interventions d'urgence en cas de catastrophe naturelle.

III.2.3. Surveillance de l'écosystème aquatique : La bathymétrie fournit des données essentielles pour surveiller et évaluer l'état de l'écosystème aquatique, en identifiant les habitats critiques pour la biodiversité, en suivant les migrations des espèces aquatiques.



Étude de la sédimentation,
<https://marine.geophysicsgpr.com/fr/applications-geophysique-marine/geologique-et-geotechnique/etude-de-la-sedimentation>



projet des étangs (hydrosystème du Vaccarès)
<https://tourduvalat.org/dossier-newsletter/lusage-de-la-modelisation-numerique-pour-soutenir-les-programmes-de-restauration-et-de-gestion-des-zones-humides/>



Levé bathymétrique à Bruant le 28 janvier 2014.
<https://journals.openedition.org/geomorphologie/11559?lang=en>

Figure III.1 Application de la bathymétrie dans le domaine des ressources en eaux.

III.3 Utilisation de la bathymétrie dans le domaine des barrages

III.3.1 Planification et conception de barrages :

Choix du site : Avant de construire un barrage, il est nécessaire de comprendre la topographie sous-aquatique de la région. La bathymétrie aide à identifier le meilleur site pour le barrage en analysant les profondeurs et les formes du fond des cours d'eau ou des réservoirs potentiels.

Calculs de volume : La bathymétrie permet de calculer le volume d'eau qui peut être stocké dans le réservoir. Ces informations sont prépondérantes pour la conception de la capacité du barrage et pour s'assurer que le barrage répondra aux besoins en eau de la région. (Mekash S and Raman A., 2021)

III.3.2. Évaluation du volume d'eau et de la capacité de stockage : En mesurant les profondeurs et les contours des plans d'eau, la bathymétrie permet d'évaluer le volume d'eau contenu dans les réservoirs, les lacs et les barrages. Cette information est déterminante pour la gestion des ressources en eau, permettant aux gestionnaires de planifier l'utilisation des réservoirs, d'optimiser la capacité de stockage et de prévoir les risques liés aux inondations et aux sécheresses. (Ibrahim PO, et al., 2022)

III.3.3. Suivi des sédiments et de l'érosion : La bathymétrie permet de suivre les dépôts de sédiments et les processus d'érosion dans les plans d'eau, en identifiant les zones sujettes à l'accumulation de sédiments ou à l'érosion. Cette information est précieuse pour la gestion de la qualité de l'eau, la préservation des habitats aquatiques et la planification de projets de restauration écologique. (Mekash S and Raman A., 2021)

III.3.4 Prévention des risques :

Les mesures bathymétriques permettent de détecter les changements dans le fond du réservoir qui pourraient indiquer des problèmes potentiels tels que des glissements de terrain sous-aquatiques ou des failles structurelles.

III.3.5 Décommissionnement :

Évaluation de l'impact environnemental : Lorsqu'un barrage doit être retiré ou démantelé, la bathymétrie peut aider à évaluer comment le fond du réservoir a été affecté et quelles mesures doivent être prises pour restaurer l'environnement aquatique.

Dans l'ensemble, la bathymétrie joue un rôle essentiel dans la surveillance et l'optimisation du fonctionnement des barrages, garantissant ainsi une gestion efficace des ressources en eau.

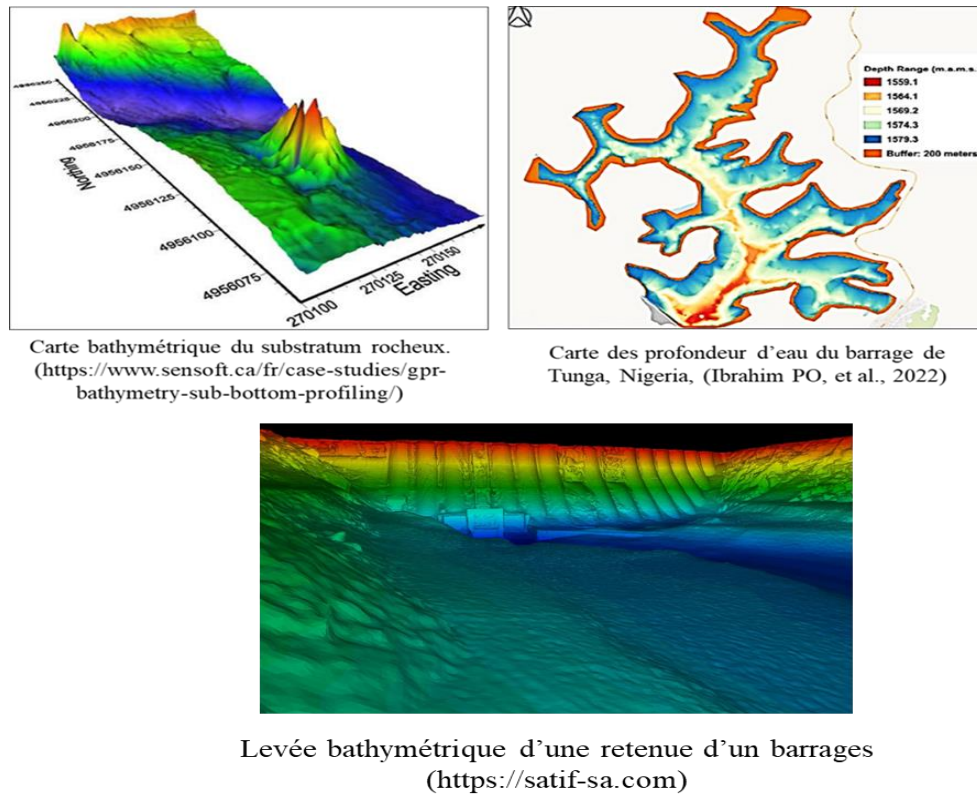


Figure III.2 Application de la bathymétrie dans le domaine des barrages.

III.4. Méthodes de mesures des profondeurs

III.4.1 Anciennes méthodes :

Avant l'avènement de la bathymétrie moderne, les marins et les explorateurs utilisaient des méthodes simples mais ingénieuses pour mesurer les profondeurs des océans, des lacs et des rivières. Ces techniques anciennes étaient essentielles pour la navigation maritime et ont contribué à l'exploration et à la cartographie des fonds marins. Bien que remplacées par des technologies plus sophistiquées, ces méthodes traditionnelles restent un témoignage de l'ingéniosité humaine et de la persévérance dans la conquête des mers.

Les méthodes anciennes de mesure des profondeurs étaient fondamentales pour la navigation maritime et l'exploration des voies navigables. Elles ont permis aux marins et aux explorateurs de cartographier les côtes, d'identifier les dangers sous-marins et de tracer des routes maritimes sûres. Bien que moins précises que les technologies modernes, ces techniques ont constitué les fondements de la cartographie sous-marine et ont ouvert la voie à des avancées significatives dans le domaine de la bathymétrie.

Parmi les méthodes anciennes utilisées :

- **Jalonnement et Plombs à Sonde** : L'une des méthodes les plus anciennes pour mesurer les profondeurs était l'utilisation de jalons et de plombs à sonde. Les marins laissaient tomber un jalon lesté ou un plomb à sonde attaché à une ligne dans l'eau

jusqu'à ce qu'il touche le fond. En mesurant la longueur de la ligne, ils pouvaient estimer la profondeur. Cette méthode, bien que simple, était sujette aux erreurs dues à la dérive de la ligne et à l'imprécision des mesures. (https://fr.wikipedia.org/wiki/Sondage_%C3%A0_main)

- **Échantillonnage du Fond** : Dans les eaux peu profondes, les navigateurs utilisaient parfois des méthodes d'échantillonnage du fond pour estimer la profondeur. Ils utilisaient des épuisettes ou des dragues pour collecter des échantillons du fond marin, puis mesuraient la longueur de la corde utilisée pour déterminer la profondeur. Bien que cette méthode fournisse des informations sur la nature du fond marin, elle était limitée en termes de précision de la profondeur.
- **Mesures Indirectes** : En l'absence d'instruments de mesure précis, les marins se fiaient souvent à des indices visuels pour estimer la profondeur. Ils observaient la couleur de l'eau, les marées, la présence de rochers ou de bancs de sable pour évaluer la profondeur relative. Cette méthode, bien qu'informelle, était largement utilisée dans les temps anciens. (<https://journals.openedition.org/vertigo/10947>)

III.4.2 Méthodes modernes :

Les méthodes sous cités, peuvent être utilisées individuellement ou combinées pour obtenir une image complète et précise des profondeurs des océans, des lacs et des autres étendues d'eau. Chaque méthode présente des avantages et des limitations en fonction des conditions environnementales et des objectifs de la mission de bathymétrie.

- **Échosondeur acoustiques mono-faisceau**

Les sondeurs acoustiques mono-faisceaux sont couramment utilisés à bord d'un bateau ou jet-ski en domaine littoral pour réaliser des levés bathymétriques. Le sondeur mono-faisceau estime la profondeur d'eau en émettant un signal acoustique à l'aplomb du navire qui est réfléchi par le fond. 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. (<https://www.dynalit.fr/Mesures/Instruments-de-mesure/Morphologie/Sondeur-acoustique>)

L'inconvénient principal de cet instrument est qu'il ne permet qu'une insonification ponctuelle du fond. C'est-à-dire qu'il n'effectue, à chaque émission d'onde acoustique, qu'une seule mesure du fond à la verticale de l'embarcation. D'autre part, les signaux acoustiques n'étant pas des perturbations instantanées, mais des vibrations continues caractérisées par leur fréquence d'émission, on obtient ainsi une représentation du fond suivant une trace définie par la trajectoire du navire et dont l'empreinte au sol dépend de l'ouverture du système et la profondeur du fond. (Bisquay H, 2010 ; Lurton X, 1998)

- **Échosondeur multifaisceaux**

Le sondeur acoustique multifaisceaux fait son apparition durant les années 70, motivé par les limitations que présente un système monofaisceau. Celui-ci mesure simultanément la profondeur du fond selon plusieurs directions. Les faisceaux générés forment une fauchée orthogonale à l'axe de l'embarcation. Ainsi, le fond étudié est exploré sur une large bande ;

on parle donc dans ce cas de « bathymétrie surfacique et d'exploration totale. (Bisquay,2010; Hurtòs Vilarnau, 2009)

Les sondeurs acoustiques multifaisceaux, utilisant une large ouverture angulaire latérale, permettent ainsi en un seul passage de décrire la bathymétrie d'une fauchée pouvant atteindre plusieurs kilomètres. Ces sondeurs sont davantage déployés pour des campagnes au large dont les profondeurs sont plus importantes qu'en en domaine littoral. Les données sont ultérieurement interpolées afin de générer des modèles numériques de terrain bathymétriques.

L'avantage des sondeurs multifaisceaux (SMF) par rapport au sondeur monofaisceau est qu'ils permettent d'explorer une bande large le long de la trajectoire du navire et que leur résolution est plus grande.

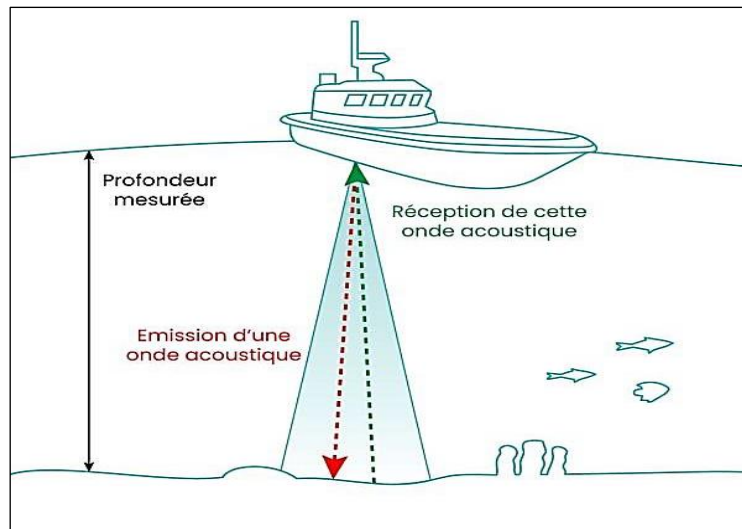


Figure III.3 Sondeur mono-faisceau. (<https://www.cadden.fr/bathymetrie-cartographie-fonds-marins/>)

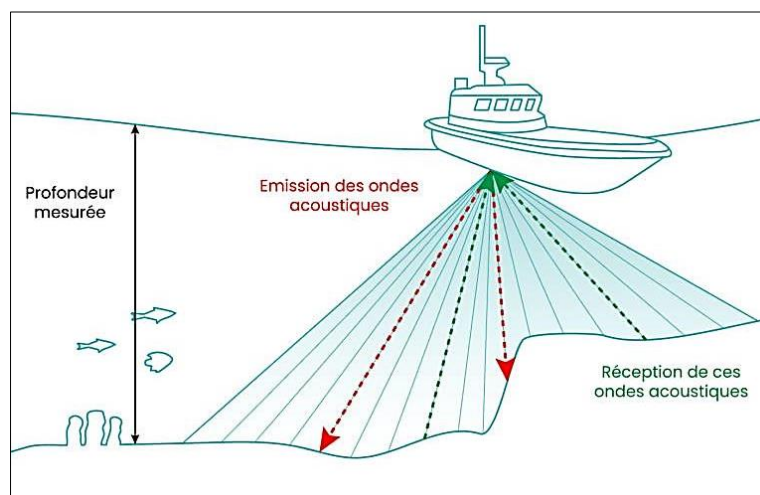


Figure III.4 Sondeur multifaisceaux. (<https://www.cadden.fr/bathymetrie-cartographie-fonds-marins/>)

La plupart des sondeurs multifaisceaux fonctionnent suivant la technique dite des « faisceaux croisés ». Suivant les explications de (Bisquay, 2010), une impulsion sonore est émise au travers d'un faisceau d'émission étroit dans la direction longitudinale (environ 1°) et large dans la direction transversale (environ 150°). Lors de la réception, le signal émis et réfléchi est capté par une antenne linéaire perpendiculaire à l'antenne d'émission (principe des antennes en croix de Mills, (Slattery, 1966)). Durant cette phase, chacun des transducteurs composants l'antenne échantillonne les échos renvoyés par le fond. La réception du signal réfléchi se faisant à l'aide de 'n' faisceaux assez larges longitudinalement (environ 20°) et fins transversalement (environ 1°) ; la Figure présente la configuration de ce principe.

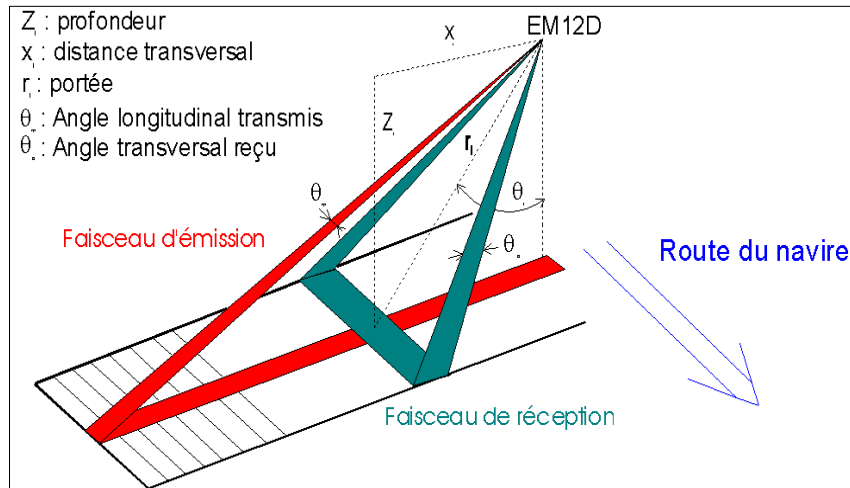


Figure III.5 Faisceaux d'émissions et de réceptions.

(https://www.pdfprof.com/PDF_Image.php?id=20686&t=25#google_vignette)

La répartition des faisceaux d'un sondeur multifaisceaux peut être de deux formes différentes suivant la technologie employée pour le système selon (Bisquay, 2010) :

- De forme équi-angulaire : c'est-à-dire que l'angle formé entre chaque faisceau est constant. De ce fait, l'écartement des zones insonifiées sur le fond ne sera pas homogène ; on obtient donc une densité forte à la verticale du sondeur et faible aux extrémités.
- De forme équidistante : dans ce cas, l'angle formé entre chaque faisceau varie suivant un espacement constant entre les zones insonifiées au sol.

➤ Lidar bathymétrique

Le système de bathymétrie par laser aéroporté (ALBS, *Airborne Laser Bathymétrie System*), aussi appelé LiDAR Bathymétrique, est une technique permettant de mesurer la profondeur d'eau en zone côtière ou peu profonde depuis les airs, par l'emploi d'un scanner laser. Récemment, les progrès réalisés dans le développement de cette technologie permettent à présent d'avoir une capacité de mesures bathymétriques d'une fréquence de 250 kHz, fournissant ainsi une densité d'environ 10-20 points/m² (Mandlbürger, et al., 2011).

Afin de procéder à la mesure du fond, les systèmes LiDAR bathymétriques émettent deux impulsions laser de longueur d'onde différente, l'une émise dans le bleu/vert visible (longueur d'onde $\lambda=532\text{nm}$) et l'autre émise dans le proche infrarouge ($\lambda=1064\text{nm}$). (Mobley, 1994).

Le faisceau laser vert va être partiellement réfléchi par la surface de l'eau, puis rétrodiffusé le long de la colonne et enfin réfléchi par le fond. Un télescope va recueillir l'ensemble de ces énergies lumineuses rétrodiffusées et les numériser. On obtient ainsi, en visualisant l'intensité du signal retour en fonction du temps, un train d'ondes retour composé typiquement de deux pics bien distincts. Le premier pic correspond au rayon laser réfléchi par la surface, tandis que le second représente le moment où il est réfléchi par le fond. Entre les deux pics on constate la composante relative à la rétrodiffusion du rayon laser par la colonne d'eau. Classiquement, on déterminerait la profondeur de l'eau en mesurant la différence temporelle entre le pic de surface et le pic de fond. Cependant, afin d'améliorer la précision lors de la détermination de la position de la surface de l'eau, les systèmes actuels (tel que le scanner laser bathymétrique Riegl VG-820-G) émettent conjointement une seconde impulsion laser proche-infrarouge (Guenther, et al., 2000). Ce rayon laser va quant à lui être presque intégralement réfléchi la surface de l'eau.

Ainsi, l'emploi de ce rayon laser fournit une seconde détermination de la surface de l'eau et permet, par la polarisation du signal retour ou par son amplitude, de distinguer la nature de la surface réfléchissante (terre ou eau).

Le principal problème de ce système réside dans le fait que la vitesse de propagation de la lumière dans l'air et dans l'eau n'est pas identique, entraînant ainsi une réfraction du faisceau laser vert suivant les lois de Snell-Descartes. Il est donc important de bien déterminer le niveau de la surface de l'eau, car une erreur sur cette grandeur entraîne rapidement une erreur sur la position 3D du fond (d'où l'importance de l'emploi d'un faisceau laser infrarouge).

Pour pallier à ce problème, la plupart des scanners laser bathymétriques aéroportés émettent, comme on peut le voir sur la Figure III.6, le rayon laser vert avec une inclinaison de 20° de manière à ce que le rayon réfracté sous la surface de l'eau est un angle d'environ $\pm 1^\circ$ par rapport à la verticale (Mandlbürger, et al., 2013).

➤ **Le SONAR par interférométrie**

Un SONAR interférométrique, plus communément appelé SONAR bathymétrique ou encore SONAR multifaisceaux, est composé d'un alignement de récepteurs situés à l'intérieur du transducteur. L'intervalle séparant ces différents récepteurs dépend de la longueur d'onde du faisceau acoustique employé. L'onde acoustique émise est réfléchi par le fond dans toutes les directions et est captée par chaque réflecteur sous un angle différent. Le SONAR va ensuite déterminer la phase de l'onde renvoyée par le fond et décomposer la période du signal en fonction du nombre de récepteurs qui le constitue.

L'emploi d'un algorithme va ensuite permettre de déterminer la distance entre un récepteur et le point réfléchi au sol, en prenant en considération l'angle d'incidence du signal au niveau du récepteur ainsi que la différence de temps de propagation de l'onde entre chacun des récepteurs. (Llort-Pujol, et al., 2012)

L'avantage de ce système est qu'il est possible, par la technologie employée, d'effectuer des mesures bathymétriques en plus d'avoir une imagerie de haute résolution et s'étendant sur une large fauchée. D'autre part, son utilisation dans des milieux où la profondeur d'eau est très faible (moins d'un mètre) paraît plus judicieuse que l'emploi d'un sondeur multifaisceaux de par son ouverture ; d'autant plus que dans le cas de courtes distances, ce dernier a tendance à recevoir des faisceaux saturés. Cependant, malgré le coût plus faible de ce matériel, lié à la simplicité de l'acoustique et des composants électroniques de réception, celui-ci ne peut pas fournir de données bathymétriques à la verticale et a un taux de mauvaises détections du fond plus élevé qu'un multifaisceaux puisqu'il a plus de mal à différencier deux échos de même distance ayant une incidence différente.

Ainsi ce type de SONAR semble s'avérer être très utile pour ce que nous cherchons à réaliser pour l'inspection des canaux et tunnels canaux dont la profondeur d'eau est très faible.

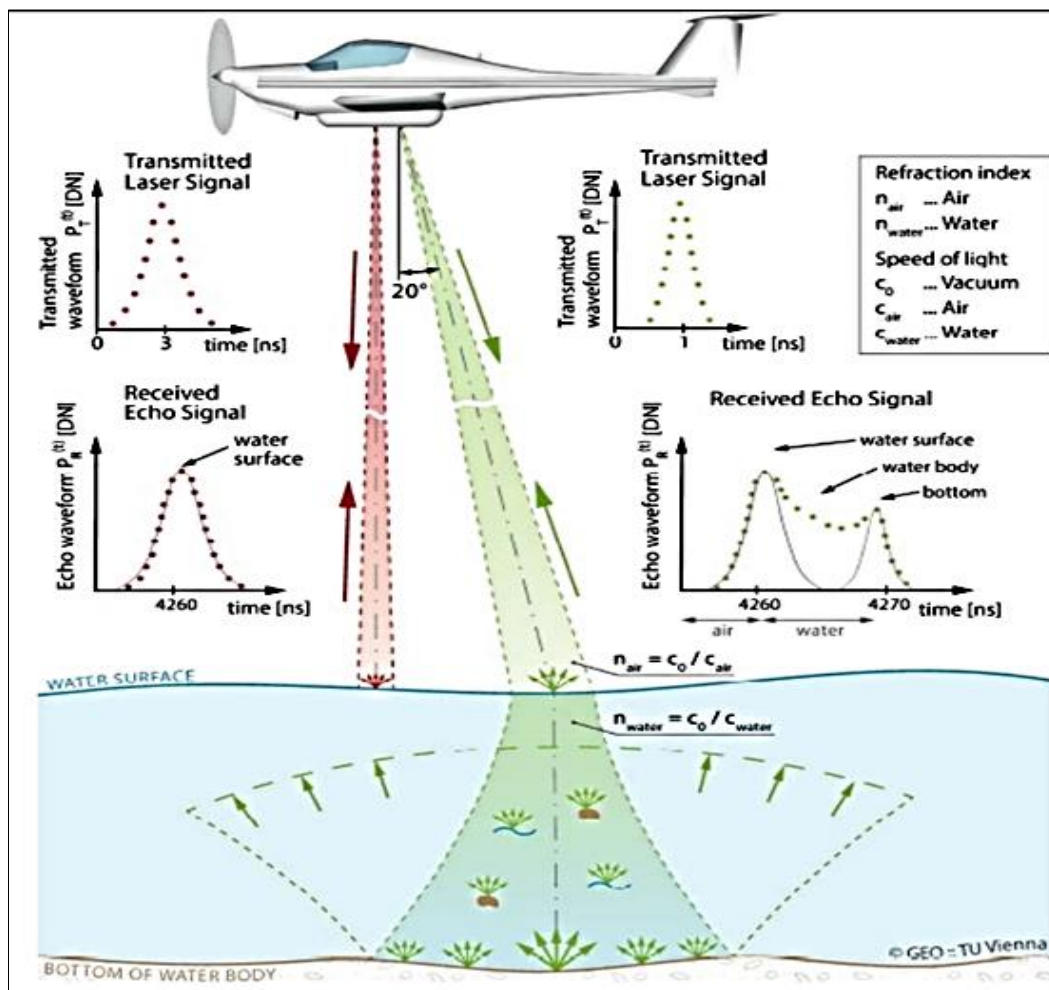


Figure III.6 Représentation schématique de la bathymétrie laser aéroportée utilisant un laser vert à pénétration d'eau pour détecter la surface et le fond de l'eau et un laser infrarouge supplémentaire pour détecter uniquement l'interface air-eau (Mandlburger et al., 2011).

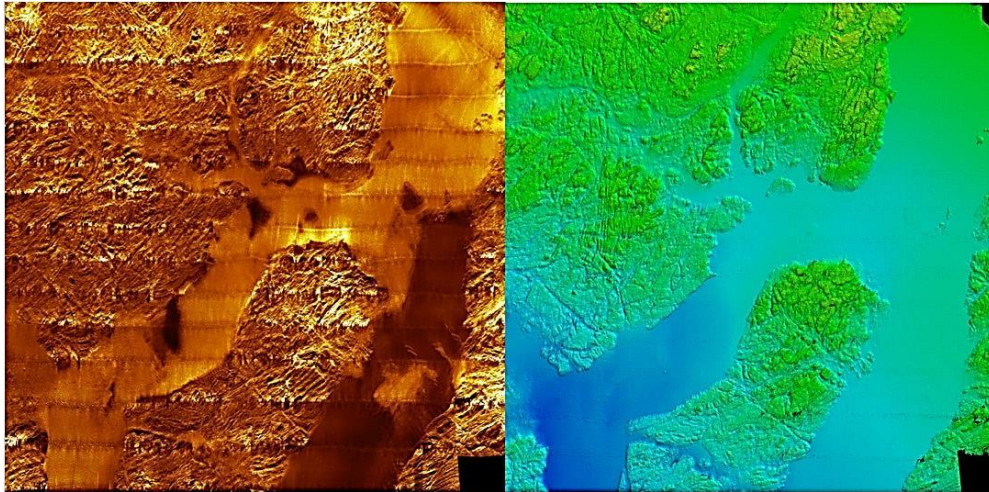


Figure III.7 Visualisation en temps réel des données acquises par le SONAR EdgeTech 4600.
(<https://www.edgetech.com/product/6205s-combined-bathymetry-side-scan-sonar/>)

III.5 Collecte de données bathymétriques et planification des levés

La collecte de données bathymétriques est une étape critique dans le processus de cartographie et d'analyse des fonds marins, des lacs et des rivières. Pour garantir l'efficacité, la précision et la sécurité des opérations sur le terrain, il est essentiel de planifier soigneusement les levés bathymétriques. (https://diffusion.shom.fr/expertises-formation/qualification_des_lev%C3%A9s_bathym%C3%A9triques.html)

III.5.1. Objectifs :

La première étape de la planification des levés bathymétriques consiste à définir clairement les objectifs de la mission. Il est important de comprendre les besoins spécifiques en matière de données, tels que la résolution spatiale requise, la couverture géographique, la profondeur d'eau cible et les caractéristiques géomorphologiques à cartographier. Ces objectifs orienteront toutes les décisions ultérieures concernant la planification et l'exécution des levés.

III.5.2 Sélection des Équipements :

Une fois les objectifs définis, le choix de l'équipement est crucial. Il peut s'agir d'échosondeurs mono ou multifaisceaux, de lidars bathymétriques, de systèmes sonar ou de drones équipés de capteurs spécialisés.

L'équipement doit être adapté aux conditions spécifiques du site, à la profondeur d'eau et aux caractéristiques géologiques du fond marin.

III.5.3 Méthodes de Collecte de Données :

Il existe plusieurs méthodes de collecte de données bathymétriques, chacune avec ses propres avantages et limitations.

- Les méthodes passives, telles que l'utilisation de sondes ou de capteurs de pression, peuvent être efficaces dans les eaux peu profondes ;
- Les méthodes actives, telles que les échosondeurs et les lidars, sont plus adaptées aux eaux profondes ou turbides.

Le choix de la méthode dépendra des objectifs de la mission, de la résolution spatiale requise et des contraintes budgétaires.

III.5.4 Gestion des Facteurs Environnementaux :

La planification des levés bathymétriques doit également prendre en compte les facteurs environnementaux tels que :

- Les conditions météorologiques ;
- Les courants marins ;
- Les marées ;
- La turbidité de l'eau ;
- La présence de navires ou d'obstacles potentiels.

Il est essentiel d'évaluer ces facteurs et de prendre des mesures pour minimiser leur impact sur la collecte de données, notamment en planifiant les levés à des moments et des endroits appropriés.

III.5.5 Sécurité et conformité réglementaire :

La sécurité des opérations sur le terrain est une priorité absolue lors de la planification des levés bathymétriques. Cela inclut :

- La formation du personnel ;
- L'utilisation d'équipements de sécurité appropriés ;
- La mise en place de procédures d'urgence et la conformité aux réglementations locales et internationales en matière de sécurité maritime et environnementale.

III.6 Acquisition des données sur le terrain

III.6.1 Drones aéroportés :

L'acquisition des données sur le terrain par des drones aéroportés est une méthode de plus en plus utilisée dans la bathymétrie moderne, offrant une flexibilité et une efficacité accrues dans la collecte d'informations sur les fonds marins, lacs et réservoirs. Après avoir planifié les levés bathymétriques, l'utilisation de drones aéroportés nécessite une approche spécifique pour garantir le succès de la collecte de données (Fig. III.8). (https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/png/PNG%202011/2010_b062.pdf)

➤ **Préparation des drones :**

Avant le déploiement sur le terrain, les drones doivent être préparés et vérifiés pour s'assurer qu'ils sont en bon état de fonctionnement. Cela comprend la vérification des batteries, des capteurs, des systèmes de propulsion et de navigation, ainsi que la calibration de l'équipement selon les spécifications requises.

➤ **Sélection des trajectoires de vol :**

La planification des trajectoires de vol est essentielle pour garantir une couverture optimale du site d'étude. Les trajectoires doivent être définies en fonction de la topographie sous-marine, de la résolution spatiale requise et des contraintes environnementales telles que la présence d'obstacles et les conditions météorologiques.

➤ **Configuration des paramètres de vol :**

Avant le décollage, les paramètres de vol du drone doivent être configurés en fonction des besoins spécifiques de la mission. Cela peut inclure la vitesse de vol, l'altitude de vol, la fréquence d'échantillonnage des capteurs, et d'autres paramètres liés à la collecte de données bathymétriques.

➤ **Déploiement sur le terrain :**

Une fois que les drones sont prêts, ils peuvent être déployés sur le terrain conformément aux trajectoires de vol planifiées. Les opérateurs de drones doivent surveiller attentivement les conditions météorologiques et les obstacles potentiels pendant le déploiement, et être prêts à ajuster les plans de vol si nécessaire.

➤ **Collecte des données bathymétriques :**

Pendant le vol, les drones utilisent des capteurs spécialisés tels que des lidars bathymétriques ou des caméras équipées de filtres spéciaux pour capturer des données sur la topographie sous-marine. Les données collectées sont géoréférencées en temps réel à l'aide de systèmes de positionnement GPS pour assurer leur exactitude spatiale.

➤ **Contrôle qualité en temps réel :**

Tout au long du vol, les opérateurs de drones doivent surveiller en temps réel la qualité des données collectées. Cela peut inclure la vérification de la résolution spatiale, la détection et la correction des erreurs de capteur, et l'évaluation de la couverture spatiale pour s'assurer que toutes les zones cibles sont correctement cartographiées.

➤ **Documentation et analyse des données :**

Une fois la collecte des données terminée, toutes les données collectées, ainsi que les informations sur les conditions de vol et les paramètres de collecte, doivent être documentées soigneusement. Les données peuvent ensuite être analysées et traitées pour générer des modèles bathymétriques 3D, des cartes topographiques sous-marines et d'autres produits cartographiques utiles.



Figure III.8 Drone aéroporté.

(https://www.bfmtv.com/international/europe/angleterre/londres-un-pilote-pense-avoir-heurte-un-drone-a-l-aeroport-d-heathrow_AN-201604180127.html)

III.6.2 Photogrammétrie par drone

La collecte de données par photographie s'appelle la photogrammétrie. C'est une technique qui consiste à relever un sujet en le recouvrant de photos successives. Les photos sont géoréférencées grâce au RTK intégré au drone DJI. Le sujet étant photographié par drone de tous les points de vue, nous post traitons les données via différents logiciels professionnels pour géoréférencé les informations sur les GCP préalablement placé au sol et relevé au GNSS RTK. Nous savons ainsi calculer le nuage de point 3d géoréférencé tout en assurant une précision centimétrique. Ce nuage de point pourrait correspondre à l'assemblage des pièces d'un puzzle. Dans ce cas toutes les photos sont assemblées pour former un résultat global en 3D. Il sera la base de tous nos livrables (photos) (Fig. III.9). (<https://www.dronexperts.com/article/photogrammetrie-par-drone/>)

L'avantage de la photogrammétrie est :

- L'aspect visuel de la technique ;
- Les éléments sont photographiés apportant ainsi une qualité, une précision et une colorisation correspondant à la réalité ;
- Création l'orthophoto du sujet, elle a l'apparence d'une simple photo mais celle-ci est constitué de millions de pixels, ainsi il est possible de zoomer sur tous les détails ;
- L'analyse, l'ortho rectification de ce livrable annule les effets de déformation de la lentille du drone lors de la prise de photos assurant une projection parfaite des coordonnées planimétriques ;
- L'analyse visuelle de l'information relevée et la superposition des données topographiques dont les altimétries du terrain.

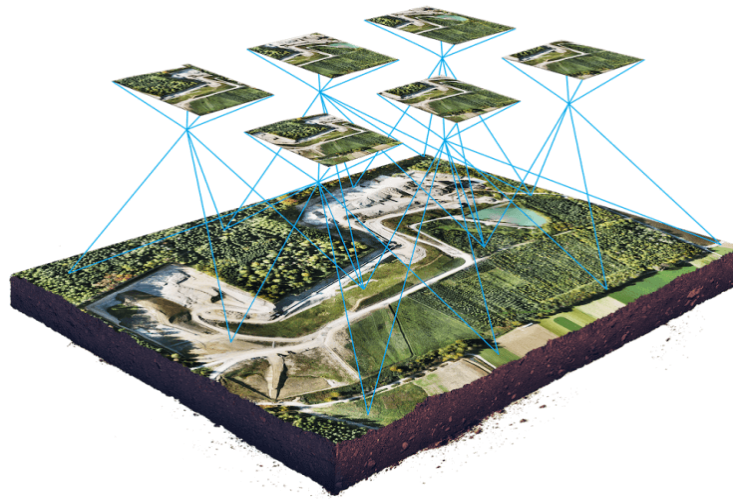


Figure III.9 Photogrammétrie par drone.

(<https://ns-communication.fr/blog/mission-drone/les-avantages-de-la-photogrammetrie-par-rapport-aux-methodes-traditionnelles>)

III.6.3 Le lidar par drone

Le lidar aéroporté est muni d'une technologie laser mobile qui permet d'émettre des millions de points par seconde (Fig. III.10). Il relève un nuage de point fidèle à la réalité sur différents niveaux jusqu'au terrain. La base GNSS positionnée au sol permet de géoréférencer avec précision le nuage de points que nous validons en post traitement. A la différence de la photogrammétrie, le lidar offre un rendu moins visuel. Sa force se trouve dans le calcul de la topographie et des points altimétriques du terrain. Il est incontournable dans le calcul du modèle numérique de terrain (MNT).

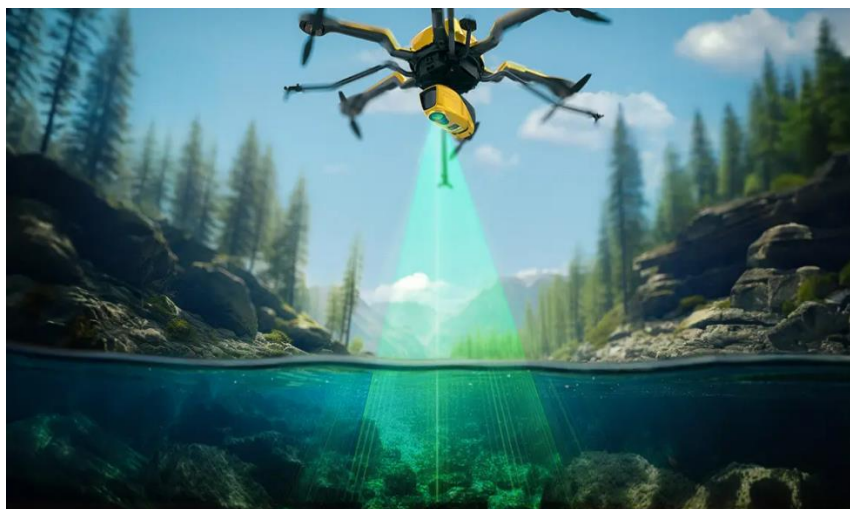


Figure III.10 LiDAR bathymétrique. (<https://www.yellowscan.com/fr/press-news/introducing-the-yellowscan-navigator-bathymetric-lidar-system/>).

III.7 Techniques de positionnement et d'orientation des drones quadricoptère

Lors de l'acquisition de données bathymétriques dans un barrage réservoir à l'aide d'un drone quadricoptère équipé d'une sonde ultrasonique (Fig. III.10), plusieurs techniques de positionnement et d'orientation peuvent être employées pour garantir la précision des données (x,y,z) .

III.7.1 Positionnement GNSS pour les Coordonnées (x,y) :

Les systèmes GNSS (Global Navigation Satellite System) peuvent être utilisés pour déterminer les coordonnées horizontales (x,y) du drone par rapport au système de coordonnées terrestre. Dans un barrage réservoir, l'utilisation de stations de base GNSS fixes avec correction en temps réel ou post-traitées peut améliorer la précision du positionnement, même dans des environnements où les signaux GNSS sont perturbés par les structures environnantes.

III.7.2 Utilisation de la sonde ultrasonique pour la profondeur (z) :

La sonde ultrasonique fixée au drone est utilisée pour mesurer la profondeur de l'eau sous le drone. Cette sonde envoie des impulsions ultrasoniques vers le bas et mesure le temps qu'il faut pour que les signaux rebondissent sur le fond de l'eau et reviennent au capteur. En combinant cette mesure avec la position horizontale du drone obtenue par le GNSS, on peut calculer la profondeur z à chaque point de mesure.

III.7.3 Correction des erreurs et des dérives :

Il est essentiel de corriger les erreurs et les dérives qui peuvent affecter la précision des mesures. Les dérives de capteur, les variations de pression atmosphérique et les conditions météorologiques peuvent tous avoir un impact sur la précision des mesures de profondeur.

Des techniques telles que l'étalonnage régulier de la sonde ultrasonique et la compensation des erreurs basées sur les données GNSS peuvent être utilisées pour minimiser ces erreurs.

III.7.4 Utilisation des données visuelles pour l'orientation :

Outre le positionnement GNSS, les données visuelles capturées par le drone peuvent être utilisées pour aider à l'orientation et à la navigation. Les caractéristiques visuelles du barrage et des environs peuvent être utilisées comme points de repère pour estimer l'orientation du drone par rapport au site d'étude.

En combinant ces techniques de positionnement et d'orientation, il est possible d'acquérir des données bathymétriques précises (x,y,z) dans un barrage réservoir à l'aide d'un drone quadricoptère équipé d'une sonde ultrasonique. Cela permet une cartographie précise du fond du réservoir, essentielle pour la gestion des ressources en eau et la sécurité des infrastructures.

III.7.5 Le système de positionnement

Un échosondeur mesure uniquement des profondeurs. Afin de rattacher les différentes mesures effectuées, il a besoin d'un système de positionnement horizontal et vertical qui lui fournit sa position. Par abus de langage on parle de GPS alors que l'on devrait parler de GNSS (ensemble comprenant un récepteur et une constellation de satellites permettant de situer un utilisateur).

Parmi les constellations les plus développées, les constellations : Américaine GPS, Russe GLONASS, Chinoise BEIDOU, Européenne GALILEO. Quatre satellites minimums sont nécessaires pour obtenir une position. Le récepteur calcule sa distance au satellite grâce à l'heure, la position et la trajectoire du satellite et par trilatération obtient sa position.

En mode naturel (c'est-à-dire sans méthode de correction) ce calcul permet d'obtenir une précision décamétrique. Mais il est parfois nécessaire d'augmenter la précision des informations reçues. C'est ce que l'on appelle la correction différentielle obtenue grâce au fonctionnement RTK ou encore PPK. Le système RTK va nous permettre d'obtenir des informations en temps réel. De son côté le GPS PPK va recevoir les informations avec un géotag approximatif et le logiciel traitera dans un second temps les informations pour corriger les informations.

Le principe de la méthode différentielle est de corriger la position (longitude, latitude et hauteur) du rover ou récepteur (dans notre cas le bateau drone) à partir d'une erreur calculée sur un point connu. Ces systèmes de corrections différentiels permettent d'obtenir des données XYZ centimétrique sur des terrains dégagés. Dès lors qu'une barrière naturelle ou artificielle existe cette précision diminue (édifications ou navires pour les zones portuaires, rideau végétale ou falaises pour les bassins naturels sont des obstacles limitent pour un GPS).

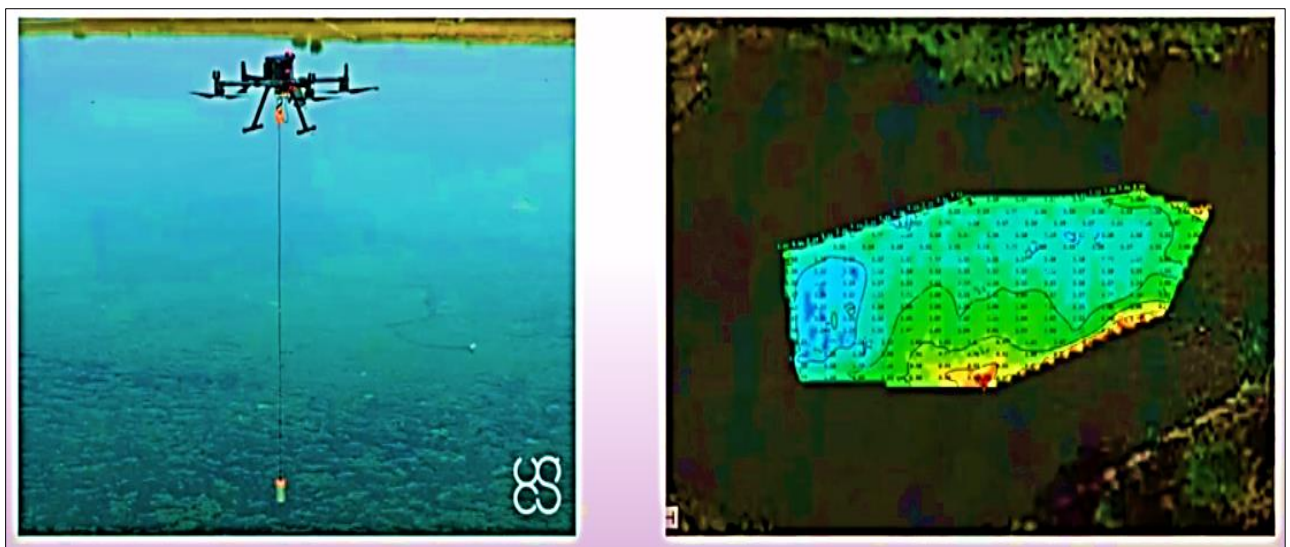


Figure III.11 Drone quadricoptère équipé d'un échosondeur.

III.8 Défis et limites de la bathymétrie

III.8.1 Profondeurs extrêmes :

La bathymétrie traditionnelle peut avoir du mal à mesurer les profondeurs extrêmes, en particulier dans les océans profonds où les pressions sont extrêmement élevées et où les signaux sonar peuvent être atténués ou déformés. Les technologies de mesure des profondeurs extrêmes, telles que les bathymétries par réflexion du sonar à large bande ou par sonar à très basse fréquence, peuvent être nécessaires pour cartographier ces zones. (Bisquay H, 2010)

III.8.2 Obstacles et structures sous-marines :

La présence d'obstacles tels que des épaves, des rochers, des récifs coralliens ou des infrastructures sous-marines peut rendre la cartographie bathymétrique difficile voire impossible dans certaines zones. Ces obstacles peuvent perturber les signaux sonar et entraîner des artefacts dans les données bathymétriques, nécessitant des méthodes de collecte de données spéciales ou des opérations de plongée sous-marine pour une cartographie précise.

III.8.3 Conditions environnementales :

Les conditions météorologiques et océanographiques, telles que les vagues, les courants, la turbidité de l'eau et les marées, peuvent avoir un impact significatif sur la qualité des données bathymétriques. Ces conditions peuvent rendre difficile la collecte de données précises et stables, en particulier dans les environnements côtiers ou dans les zones sujettes aux tempêtes et aux conditions météorologiques extrêmes.

III.8.4 Coût et complexité des équipements :

Les équipements spécialisés nécessaires pour la bathymétrie, tels que les échosondeurs multifaisceaux, les lidars bathymétriques et les drones équipés de capteurs, peuvent être coûteux à acquérir, à entretenir et à exploiter. De plus, leur utilisation nécessite souvent une expertise technique et une formation spéciale, ce qui peut limiter leur accessibilité à certains utilisateurs.

III.8.5 Limitations de résolution :

La résolution spatiale des données bathymétriques peut être limitée par la capacité des capteurs à distinguer de petits détails et des variations de relief subtiles sur le fond marin ou les plans d'eau. Cela peut rendre difficile la cartographie précise des caractéristiques géomorphologiques fines ou des habitats aquatiques sensibles.

III.9 Perspectives futures et innovations

Les perspectives futures de la bathymétrie sont prometteuses, avec un certain nombre d'innovations technologiques en cours de développement et d'exploration (https://iho.int/uploads/user/pubs/bathy/B_12_Ed.2.0.3_2020-FR.pdf) :

III.9.1 Amélioration de la résolution et de la précision :

Les progrès dans les technologies d'imagerie, tels que les échosondeurs multifaisceaux à haute résolution et les lidars bathymétriques aéroportés, permettront d'améliorer la résolution spatiale et la précision des données bathymétriques. Cela permettra une cartographie plus détaillée des fonds marins et des plans d'eau, permettant une meilleure compréhension des caractéristiques géologiques et géomorphologiques.

III.9.2 Utilisation de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique :

L'intégration de techniques d'intelligence artificielle (IA) et d'apprentissage automatique (machine learning) dans l'analyse des données bathymétriques pourrait permettre d'identifier automatiquement les caractéristiques géologiques, les habitats aquatiques et les changements environnementaux à partir des données collectées. Cela faciliterait l'interprétation et l'exploitation des données bathymétriques à grande échelle.

III.9.3 Miniaturisation des capteurs et des équipements :

La miniaturisation des capteurs et des équipements de bathymétrie, tels que les échosondeurs et les drones, permettra une collecte de données plus flexible et économique, en particulier dans les zones difficiles d'accès ou dans les environnements sensibles. Des drones plus petits et plus maniables équipés de capteurs sophistiqués pourraient être déployés pour des missions de cartographie à plus petite échelle.

III.9.4 Intégration de données multi-sources :

L'intégration de données bathymétriques avec d'autres sources de données, telles que les données hydrologiques, les données géophysiques et les données environnementales, permettra une compréhension plus holistique des systèmes aquatiques. Cela facilitera l'évaluation des risques naturels, la gestion des ressources en eau et la conservation de l'environnement.

III.9.5 Développement de capteurs multimodaux :

Le développement de capteurs multimodaux, capables de collecter simultanément des données bathymétriques, géophysiques, chimiques et biologiques, ouvrira de nouvelles perspectives pour la surveillance et la caractérisation des écosystèmes aquatiques. Ces capteurs intégrés permettront une collecte de données plus efficace et une analyse plus approfondie des environnements aquatiques.

III.9.6 Utilisation de la télédétection et de l'imagerie satellitaire :

L'utilisation de la télédétection et de l'imagerie satellitaire pour la bathymétrie, en particulier dans les zones côtières et peu profondes, offre une alternative économique et évolutive à la collecte de données sur le terrain. Des satellites équipés de capteurs bathymétriques pourraient être utilisés pour surveiller les changements de niveau de l'eau, les mouvements sédimentaires et les habitats côtiers.

Conclusion

La bathymétrie représente un élément indispensable dans le domaine hydraulique, offrant une panoplie d'applications prépondérantes pour la gestion et la préservation des ressources en eau. À travers sa capacité à cartographier avec précision les fonds marins, les lits de rivières, les réservoirs et les lacs, la bathymétrie fournit des données vitales pour comprendre et gérer efficacement les systèmes aquatiques.

La bathymétrie permet d'évaluer le volume d'eau et la capacité de stockage des réservoirs, de surveiller les sédiments et l'érosion, de modéliser les flux hydrauliques, de prévoir les risques naturels tels que les inondations et les sécheresses, et de surveiller l'évolution des écosystèmes aquatiques.

Ces données bathymétriques sont essentielles pour prendre des décisions éclairées en matière de gestion des ressources en eau, en planifiant l'utilisation des réservoirs, en prévenant les risques liés aux inondations et en préservant les habitats aquatiques. De plus, elle joue un rôle décisif dans la planification et la construction d'infrastructures hydrauliques telles que les barrages, les ports et les quais, en fournissant des informations précieuses sur les conditions sous-marines.

Malgré les défis et les limites associés à la collecte et à l'interprétation des données bathymétriques, des progrès technologiques continus ouvrent de nouvelles perspectives pour améliorer la résolution, la précision et l'efficacité de la bathymétrie. Ces avancées permettront une gestion plus efficace et durable des ressources en eau, contribuant ainsi à la sécurité et à la prospérité des populations à travers le monde.

PARTIE II

ETUDE DE LA CONCEPTION

DU DRONE BATHYMETRIQUE

Chapitre IV

CHAPITRE IV : APERÇU SUR L'ÉQUIPEMENT

Introduction

Dans le domaine de la cartographie et de la gestion des ressources hydriques, la bathymétrie, qui consiste en la mesure des profondeurs des plans d'eau. Cette pratique fournit des informations vitales pour comprendre la topographie sous-marine des lacs, des rivières et des barrages réservoirs, facilitant ainsi une gestion efficace des écosystèmes aquatiques et des infrastructures hydrauliques. Traditionnellement, la collecte de données bathymétriques était une tâche complexe et souvent coûteuse, nécessitant l'utilisation de bateaux équipés de sonars spécialisés et d'autres équipements sophistiqués.

Cependant, l'avènement de la technologie des drones a révolutionné cette pratique en offrant une approche plus efficace, économique et flexible pour la collecte de données bathymétriques. Les drones quadricoptères, équipés de capteurs tels que les échosondeurs et les systèmes de positionnement global (GPS), peuvent être déployés avec précision et facilité pour cartographier les profondeurs des plans d'eau, y compris les barrages réservoirs, offrant ainsi une solution innovante pour répondre aux besoins croissants en matière de surveillance et de gestion des ressources hydriques.

En combinant l'innovation technologique avec les besoins croissants en surveillance environnementale, l'utilisation de drones pour la bathymétrie représente une étape significative vers une gestion plus efficace et durable des ressources hydriques. En explorant cette approche novatrice, nous ouvrons la voie à de nouvelles possibilités pour une meilleure compréhension et préservation de nos écosystèmes aquatiques, tout en répondant aux défis posés par les changements environnementaux mondiaux.

IV.1 Les composants essentiels d'un drone quadricoptères :

IV.1.1 Cadre :

Le cadre d'un drone quadricoptère est sa structure de base, fournissant à la fois la résistance structurelle nécessaire pour soutenir les composants et la configuration spatiale pour le positionnement correct de ces composants. Parmi les matériaux couramment utilisés dans la fabrication des cadres de drones quadricoptères (Fig. IV.1), on cite :

- *Plastique* : Le plastique ABS ou le plastique renforcé de fibre de verre (FRP) sont souvent utilisés pour les cadres de drones économiques. Ils offrent une bonne durabilité tout en étant légers, mais peuvent être moins résistants aux chocs que d'autres matériaux ;
- *Fibre de carbone* : La fibre de carbone est un matériau composite extrêmement léger et rigide, offrant une excellente résistance structurelle tout en réduisant le poids total du drone. Les cadres en fibre de carbone sont populaires parmi les drones haut de gamme en raison de leur légèreté et de leur robustesse.

- **Aluminium** : L'aluminium est également utilisé dans la fabrication de cadres de drones en raison de sa légèreté et de sa résistance. Les cadres en aluminium peuvent être plus coûteux que ceux en plastique, mais offrent une meilleure durabilité et une résistance aux chocs améliorée.

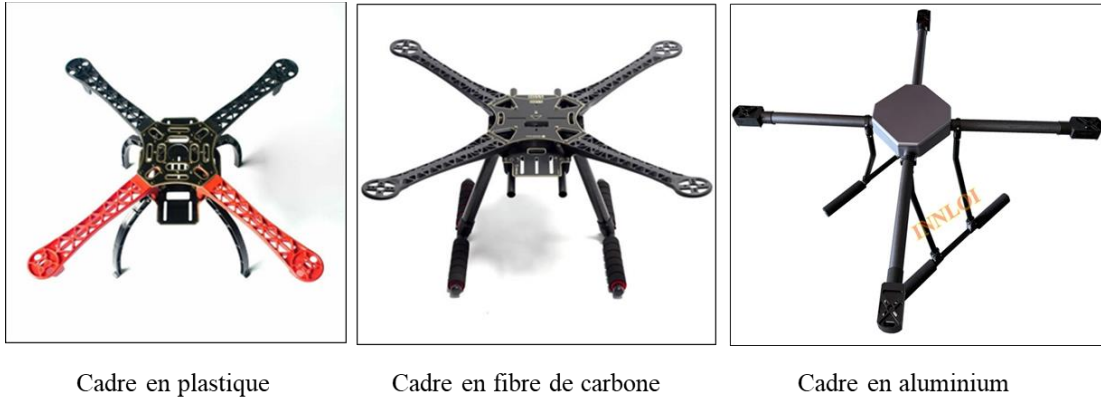


Figure IV.1 : Différents matériaux pour la fabrication des cadres.

(<https://fr.aliexpress.com/item/32821843706.html>)

IV.1.2 Moteurs :

Les drones quadricoptères sont équipés de quatre moteurs, un pour chaque hélice. Ces moteurs fournissent la poussée nécessaire pour maintenir le drone en vol, et les hélices convertissent cette puissance en mouvement ascendant (Kilby T & Kilby B, 2015)

- **Types de moteurs** : Les drones quadricoptères utilisent généralement des moteurs électriques brushless en raison de leur efficacité, de leur fiabilité et de leur puissance (Fig. IV.2). Ces moteurs sont sans balais, ce qui signifie qu'ils n'ont pas de contacts électriques frottant, réduisant ainsi l'usure et augmentant la durée de vie.
- **Puissance et KV** : La puissance des moteurs est mesurée en watts et est généralement choisie en fonction de la taille et du poids du drone, ainsi que des performances de vol souhaitées. La constante de vitesse (KV) d'un moteur brushless indique le nombre de tours par minute (RPM) qu'il effectue par volt appliqué en charge. Un KV plus élevé signifie que le moteur tournera plus rapidement, ce qui peut être utile pour les drones nécessitant une forte accélération.
- **Nombre de moteurs** : Les drones quadricoptères ont quatre moteurs, un pour chaque hélice. Ces moteurs sont disposés de manière symétrique autour du cadre du drone pour assurer un équilibre de la poussée et une stabilité en vol.
- **Contrôle électronique de vitesse (ESC)** : Chaque moteur est associé à un contrôleur électronique de vitesse (ESC), qui régule la vitesse du moteur en fonction des signaux reçus du contrôleur de vol (Fig. IV.3). Les ESC convertissent les signaux de commande en

puissance appropriée pour les moteurs, permettant ainsi un contrôle précis de la vitesse et de la direction.



Figure IV.2 : Moteur Brushless
(<https://www.studiosport.fr/moteur-brushless-3508-380-ou-580-kv-a16785.html>)



Figure IV.3 : Contrôle de Vitesse 30A
(<https://www.ebay.com/itm/395165961067>)

IV.1.3 Hélices :

Les hélices sont des composants essentiels des drones quadricoptères, fournissant la force de propulsion nécessaire pour maintenir le vol (Fig. IV.4). (Mcgriffy D, 2017)

- *Taille et pas* : Les hélices varient en taille et en pas, influençant directement les performances de vol. La taille de l'hélice détermine la quantité d'air déplacée par rotation, tandis que le pas indique la distance théorique parcourue par l'hélice pendant une rotation complète.
- *Configuration* : Les drones quadricoptères utilisent généralement des hélices à deux pales montées de manière à tourner dans le sens inverse l'une de l'autre pour compenser les forces de couple et assurer la stabilité en vol.
- *Matériaux* : Les hélices sont fabriquées en plastique, en fibre de carbone ou en bois de haute qualité pour garantir durabilité et légèreté. Les hélices en plastique sont courantes en raison de leur coût abordable, tandis que celles en fibre de carbone offrent des performances optimales.
- *Équilibrage* : Il est essentiel d'équilibrer correctement les hélices avant de les installer sur les moteurs pour réduire les vibrations et assurer un fonctionnement optimal.



Figure IV.4 : Hélice pour drone quadricoptères. (<https://www.amazon.com/XNasu-Propeller-Replacement-Propellers-Accessories/dp/B0CKSD75JP?th=1>)

IV.1.4 Contrôleurs de vol :

Ces composants électroniques sont le cerveau du drone, contrôlant le fonctionnement des moteurs et régulant la stabilité en vol. Les contrôleurs de vol utilisent des algorithmes de contrôle pour ajuster les vitesses des moteurs et maintenir le drone en équilibre (Fig. IV.5). (Mcgriffy D, 2017)

- *Rôle:* Les contrôleurs de vol sont responsables de la gestion de la stabilité, de l'orientation et du mouvement du drone en vol. Ils reçoivent des données des capteurs intégrés tels que les gyroscopes, les accéléromètres et parfois les baromètres, qui mesurent l'attitude du drone (roulis, tangage, lacet) ainsi que sa vitesse et son altitude. En fonction de ces données, les contrôleurs de vol calculent les ajustements nécessaires pour maintenir le drone en équilibre et en mouvement selon les commandes du pilote ou les paramètres de vol prédéfinis.
- *Fonctionnement:* Les contrôleurs de vol utilisent des algorithmes de stabilisation et de contrôle pour interpréter les données des capteurs et générer des commandes de sortie pour les moteurs du drone. Ces commandes sont envoyées aux contrôleurs électroniques de vitesse (ESC), qui régulent la vitesse et la direction des moteurs. Les contrôleurs de vol peuvent également intégrer des systèmes de navigation tels que le GPS, permettant au drone de maintenir sa position dans l'espace, de suivre des trajectoires prédéfinies ou de revenir à un point de départ désigné en cas de perte de signal ou d'urgence.
- *Types:* Il existe différents types de contrôleurs de vol, allant des modèles basiques conçus pour les drones de loisirs aux unités plus avancées destinées aux applications professionnelles ou commerciales. Certains contrôleurs de vol sont programmables, ce qui permet aux utilisateurs d'ajuster les paramètres de vol selon leurs besoins spécifiques. Les contrôleurs de vol peuvent être autonomes, intégrés directement dans le châssis du drone, ou externes, se connectant au drone via des ports de communication tels que le port USB ou les connexions radio.

- *Calibration et Configuration* : Avant la première utilisation et périodiquement par la suite, les contrôleurs de vol doivent être calibrés pour garantir des performances optimales. Cela implique souvent de placer le drone dans une position stable et de suivre les instructions du fabricant pour calibrer les capteurs et les paramètres de vol. Les utilisateurs peuvent également ajuster les paramètres de vol tels que les gains de stabilisation, les limites de l'angle d'inclinaison et les réponses aux commandes du pilote via des logiciels de configuration spécifiques.

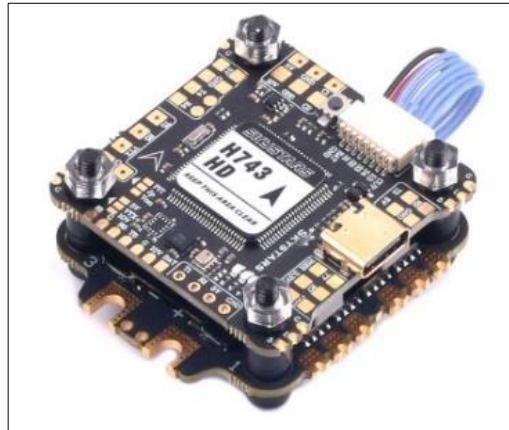


Figure IV.5 : Contrôleurs de vol pour drones racer
(<https://ar.aliexpress.com/item/1005004533823016.html>)

IV.1.5 Batterie :

La batterie est un élément déterminant des drones quadricoptères, fournissant l'énergie électrique nécessaire pour alimenter tous les composants du drone, y compris les moteurs, les contrôleurs de vol, les capteurs et éventuellement les caméras embarquées. (Kilby T & Kilby B, 2015)

- *Type*: Les drones quadricoptères utilisent généralement des batteries rechargeables au lithium-polymère (LiPo) en raison de leur densité énergétique élevée, de leur faible poids et de leur capacité à fournir une puissance élevée de manière efficace. Les batteries LiPo offrent également une décharge constante, ce qui est important pour maintenir la stabilité en vol (Fig. IV.6).
- *Capacité et Tension* : La capacité d'une batterie est mesurée en ampères-heures (Ah) et indique la quantité d'énergie qu'elle peut stocker. Une capacité plus élevée permet généralement des vols plus longs, mais peut également augmenter le poids du drone. La tension de la batterie, mesurée en volts (V), détermine la puissance disponible pour les composants électriques du drone.
- *Configuration*: Les batteries des drones quadricoptères sont généralement configurées en tant que packs de cellules individuelles, chaque cellule fournissant une tension nominale de 3,7 volts. Les batteries LiPo peuvent avoir différentes configurations de cellules, telles que 2S (deux cellules en série), 3S, 4S, etc., ce qui détermine la tension totale de la batterie.

- *Gestion*: Il est essentiel de gérer correctement les batteries LiPo pour assurer leur sécurité et prolonger leur durée de vie. Cela inclut la charge avec un chargeur approprié et la surveillance de la tension et de la température pendant l'utilisation. Les batteries LiPo doivent également être stockées à une tension appropriée pour éviter toute détérioration.
- *Autonomie de vol* : La capacité de la batterie et l'efficacité énergétique du drone déterminent l'autonomie de vol, c'est-à-dire la durée pendant laquelle le drone peut rester en vol avant de devoir retourner pour recharger sa batterie. Des facteurs tels que le poids total du drone, la puissance des moteurs et les conditions de vol affectent également l'autonomie de vol.
- *Recharge et remplacement* : Après chaque vol, la batterie du drone doit être rechargée à l'aide d'un chargeur spécifique compatible avec les batteries LiPo. Il est important de suivre les instructions du fabricant pour éviter les surcharges ou les décharges excessives, ce qui peut endommager la batterie. Les batteries LiPo ont une durée de vie limitée et doivent éventuellement être remplacées après un certain nombre de cycles de charge et de décharge. Il est recommandé d'avoir des batteries de rechange pour prolonger le temps de vol du drone sur le terrain.



Figure IV.6 : Batterie LiPo à quadricoptère drone. (<https://prodigo.fr/drone-eviter-risques-batteries/>)

IV.1.6 Système de transmission :

Le système de transmission des drones quadricoptères est responsable de la communication entre le drone et le pilote ou le système de contrôle au sol. Il permet de transmettre en temps réel des données telles que la vidéo en direct, les informations de télémétrie et les commandes de vol (Kilby T & Kilby B, 2015). Les drones quadricoptères utilisent différentes technologies de transmission pour communiquer avec le pilote ou le système de contrôle au sol cela consiste en :

- *Technologies de Transmission* : Les drones quadricoptères utilisent différentes technologies de transmission pour communiquer avec le pilote ou le système de contrôle au sol :
 - **Radiofréquence (RF)** : Les drones utilisent généralement des émetteurs-récepteurs RF pour transmettre des signaux de commande de vol et de télémétrie entre le drone et la télécommande du pilote. Les fréquences radio couramment utilisées sont 2,4 GHz et 5,8 GHz ;
 - **Wi-Fi** : Certains drones peuvent utiliser une connexion Wi-Fi pour transmettre des données vidéo en direct vers un appareil mobile tel qu'une tablette ou un smartphone, permettant au pilote de visualiser le vol en direct ;
 - **Télémétrie par radio** : Les données de télémétrie telles que la vitesse, l'altitude et la tension de la batterie peuvent être transmises au pilote via une liaison radio séparée de la commande de vol principale ;
 - **Transmission vidéo numérique** : Les drones haut de gamme peuvent utiliser des systèmes de transmission vidéo numérique tels que DJI Lightbridge ou OccuSync pour une transmission vidéo en direct haute définition avec une faible latence. (Fig. IV.7).
- *Portée et Fiabilité* :
 - La portée et la fiabilité du système de transmission sont des considérations importantes lors du choix d'un drone. Les systèmes RF ont généralement une portée plus longue que le Wi-Fi, mais peuvent être sujets à des interférences et à des pertes de signal dans des environnements encombrés.
 - Les systèmes de transmission numérique offrent souvent une meilleure qualité vidéo et une plus grande résistance aux interférences, mais peuvent être plus coûteux et avoir une portée légèrement plus courte que les systèmes RF. (Smith M, 2015)
- *Latence* : La latence, c'est-à-dire le délai entre le moment où une action est effectuée sur la télécommande et le moment où elle est effectivement exécutée par le drone, est un autre aspect important du système de transmission. Une faible latence est essentielle pour un pilotage précis et réactif du drone, en particulier lors de vols à grande vitesse ou dans des environnements complexes ;
- *Sécurité et confidentialité* : La sécurité et la confidentialité des transmissions sont cruciales pour éviter les interférences avec d'autres appareils RF et pour protéger les données sensibles échangées entre le drone et le pilote. Les protocoles de cryptage

peuvent être utilisés pour sécuriser les transmissions vidéo et de données. (Asadi A, 2016)

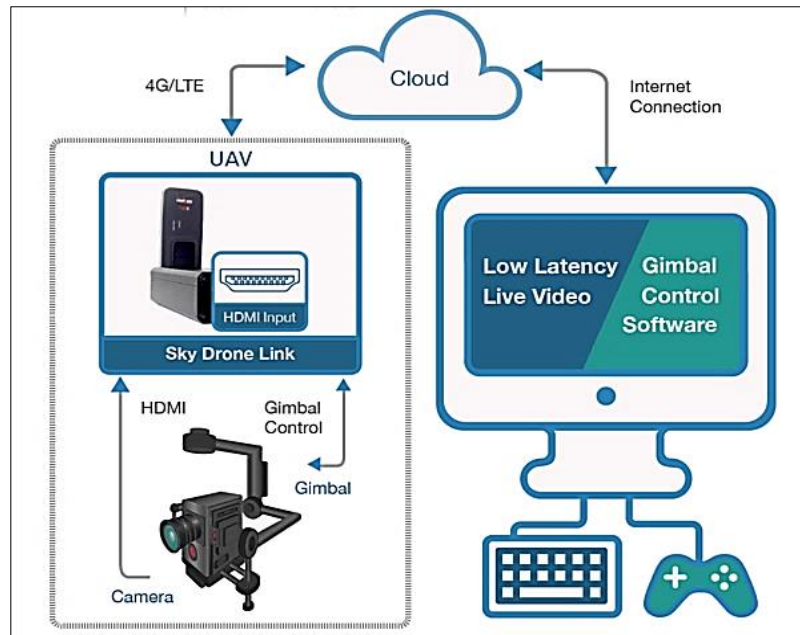


Figure IV.7 : Kits de transmission vidéo 4G (<http://helicomicro.com/2019/02/05/sky-dronr-kits-transmission-vedeo-4g>)

IV.1.7 Capteurs :

- Les capteurs sont des éléments clés des drones quadricoptères, fournissant des informations vitales sur leur environnement, leur état et leur position. Ci-dessous les différents types de capteurs utilisés dans les drones (Asadi A, 2016)
- **Gyroscopes** : Les gyroscopes mesurent les taux de rotation du drone autour de ses axes, fournissant des informations sur son attitude et sa stabilité. Ils permettent au contrôleur de vol de compenser les mouvements indésirables et de maintenir le drone en équilibre (Fig. IV.8) ;
- **Accéléromètres** : Les accéléromètres mesurent l'accélération linéaire du drone dans les trois dimensions de l'espace. Ils sont utilisés pour déterminer la vitesse et la direction du mouvement du drone, ainsi que pour détecter les changements d'altitude et les inclinaisons (Fig. IV.9) ;
- **Magnétomètres**: Les magnétomètres détectent le champ magnétique terrestre et permettent au drone de déterminer son orientation par rapport au nord magnétique. Ils sont utilisés en conjonction avec les gyroscopes et les accéléromètres pour fournir une information de positionnement plus précise ;
- **Baromètres**: Les baromètres mesurent la pression atmosphérique, ce qui permet d'estimer l'altitude du drone par rapport au niveau de la mer. Ils sont utilisés pour maintenir une

altitude constante lors du vol en mode altitude hold et pour calculer les variations d'altitude pendant le vol ;

- *GPS (Système de Positionnement Global)*: Le GPS permet au drone de déterminer sa position absolue dans le monde en recevant des signaux satellites. Il est utilisé pour la navigation, le suivi de trajectoire, le maintien de la position stationnaire et le retour automatique à la maison en cas de perte de signal (Fig. IV.10) ;
- *Caméras et capteurs optiques* : Les drones peuvent être équipés de caméras et de capteurs optiques pour la capture d'images, la détection d'obstacles, la reconnaissance d'objets et la cartographie 3D. Ces capteurs sont utilisés pour des applications telles que la photographie aérienne, la surveillance et la modélisation de l'environnement ;
- *Capteurs ultrasoniques* : Les capteurs ultrasoniques mesurent la distance par rapport au sol en émettant des ondes sonores et en mesurant le temps nécessaire pour qu'elles rebondissent. Ils sont utilisés pour maintenir une altitude constante lors du vol à basse altitude et pour éviter les collisions avec le sol (Fig. IV.11) ;
- *Capteurs de flux optique* : Les capteurs de flux optique détectent les mouvements horizontaux en analysant les changements dans les motifs visuels de la scène en dessous du drone. Ils sont utilisés pour maintenir une position stationnaire précise lors du vol en intérieur ou dans des environnements sans GPS.



Figure IV.8: Gyroscopes pour UAV (Différent modèle)
(<https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/gyroscopes/>)



Figure IV.9: Accéléromètres pour drone
(<https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/gyroscopes/>)



Figure IV. 10: Module GPS pour drone
(<https://www.amazon.fr/Contr%C3%B4leur-Boussole-Embarqu%C3%A9e-Aircraft-Controlled/dp/B0BSTSC1B1>)



Figure IV.11: Capteur imperméable de distance à ultrasons
(<https://youpilab.com/components/produit/capteur-impermeable-de-distance-a-ultrasons>)

IV.1.8 Système de Navigation :

Le système de navigation des drones quadricoptères est responsable de déterminer leur position, leur orientation et leur trajectoire dans l'espace (Fig. IV.12). Il combine plusieurs technologies pour permettre au drone de voler de manière autonome et de réaliser des tâches spécifiques. (Mcgriffy D, 2017)

- *GPS (Système de Positionnement Global)*: Le GPS est une technologie de positionnement par satellite qui permet au drone de déterminer sa position géographique absolue avec une grande précision. Les récepteurs GPS à bord du drone reçoivent des signaux provenant de plusieurs satellites en orbite et calculent les coordonnées géographiques (latitude, longitude et altitude) du drone.
- *IMU (Inertial Measurement Unit)*: L'IMU est un système composé de gyroscopes et d'accéléromètres qui mesure l'attitude, la vitesse angulaire et l'accélération linéaire du drone dans les trois axes de l'espace. Ces informations sont utilisées pour estimer la position et l'orientation du drone en l'absence de signaux GPS, notamment lors du vol en intérieur ou dans des environnements où le signal GPS est faible ou absent.
- *Compas Magnétique*: Le compas magnétique, ou magnétomètre, détecte le champ magnétique terrestre et permet au drone de déterminer son orientation par rapport au nord magnétique. Il est utilisé pour la stabilisation en vol, la navigation et la correction de cap.
- *Systèmes de vision et de détection d'obstacles* : Certains drones sont équipés de caméras et de capteurs optiques qui analysent l'environnement visuel du drone en temps réel. Ces systèmes de vision permettent au drone de détecter et d'éviter les obstacles, de suivre des cibles spécifiques et de naviguer de manière autonome dans des environnements complexes.

- **Altimètre Barométrique:** L'altimètre barométrique mesure la pression atmosphérique pour estimer l'altitude du drone par rapport au niveau de la mer. Il est utilisé pour maintenir une altitude constante lors du vol en mode altitude hold et pour calculer les variations d'altitude pendant le vol.
- **Planification de trajectoire et navigation autonome :** Les drones peuvent être programmés pour suivre des trajectoires spécifiques et réaliser des missions de vol autonomes. Les systèmes de navigation autonomes utilisent des algorithmes de planification de trajectoire pour déterminer le meilleur chemin à suivre en fonction des objectifs de la mission et des contraintes environnementales.



Figure IV.12: Navigation d'un drone par un système de satellites
(<https://www.helicomicro.com/2021/10/10/asio-technology-navguard-un-outil-tactique-pour-faire-face-a-la-perte-de-reception-gps/>)

Conclusion :

L'intégration harmonieuse des différents composants dans la conception des drones quadricoptères est essentielle pour leur fonctionnement efficace et autonome en vol. Chaque composant, qu'il s'agisse du cadre structurel, des moteurs et des hélices, des contrôleurs de vol, de la batterie, du système de transmission, des capteurs ou du système de navigation, joue un rôle crucial dans la réalisation de missions aériennes diverses et complexes.

En combinant leurs fonctionnalités et leurs capacités respectives, ces composants permettent aux drones quadricoptères de voler avec précision, de s'adapter à leur environnement et de réaliser des tâches variées, allant de la surveillance et de la cartographie à la recherche et au sauvetage.

Ces avancées dans la conception des drones ont ouvert de nouvelles perspectives dans de nombreux domaines, notamment l'ingénierie, la recherche scientifique, l'agriculture, l'inspection industrielle et bien d'autres. Cependant, des défis subsistent, notamment en matière de sécurité, de réglementation et d'intégration dans l'espace aérien existant.

Les drones équipés de capteurs spécialisés, tels que les échosondeurs attachés par un fil, peuvent fournir des mesures précises de la bathymétrie des réservoirs, permettant une cartographie détaillée du fond des lacs et des rivières. Ces informations sont essentielles pour la gestion des ressources en eau, la planification des projets hydrauliques et la maintenance des infrastructures hydroélectriques.

En exploitant les capacités des drones quadricoptères pour collecter des données géospatiales en temps réel, les ingénieurs hydrauliques peuvent améliorer la surveillance des barrages réservoirs, optimiser l'utilisation des ressources en eau et renforcer la résilience des communautés face aux événements hydrologiques extrêmes. En conséquence, l'intégration de ces technologies dans le domaine hydraulique offre un potentiel considérable pour améliorer la gestion des ressources en eau et contribuer à un avenir durable et résilient.

Chapitre V

CHAPITRE V : CONCEPTION D'UN QUADRICOPTÈRE BATHYMÉTRIQUE

Introduction :

L'intégration des drones quadricoptères dans le domaine hydraulique offre des possibilités prometteuses pour la collecte de données et la surveillance des barrages réservoirs. En effet, ces dispositifs offrent une solution efficace et flexible pour obtenir des informations précieuses sur les profondeurs des réservoirs, la topographie sous-marine et les variations de niveau d'eau. Ces données sont fondamentales pour évaluer la capacité de stockage des barrages, surveiller les changements hydrologiques et prévenir les risques liés aux inondations.

La conception de véhicules aériens sans pilote (UAV), notamment les quadricoptères, est devenue une discipline essentielle dans le domaine de l'ingénierie aéronautique et de la robotique. Le projet présenté dans ce chapitre se concentre sur la conception et l'optimisation structurelle d'un quadricoptère bathymétrique à l'aide de SolidWorks, nous aborderons la création des pièces individuelles du cadre, leur assemblage, l'intégration des composants supplémentaires nécessaires pour la mission bathymétrique.

Afin d'améliorer les performances de notre quadricoptère, nous inclurons différents éléments indispensables : un échosondeur à ultrasons relié par un fil pour mesurer les distances avec précision, un module GPS pour la navigation et le positionnement, ainsi qu'un contrôleur de vol pour gérer la stabilité et la trajectoire de vol.

Enfin, nous préparerons les fichiers de conception pour leur fabrication, que ce soit par impression 3D ou découpe CNC, assurant ainsi que chaque composant est prêt pour la production et l'assemblage final.

Ce projet, par son approche méthodique et ses applications pratiques, représente une avancée significative dans l'utilisation des UAV pour la collecte de données environnementales.

V.1.Conception du quadricoptère F450

V.1.1 Châssis F450

V.1.1.1 Présentation du châssis F450

Le cadre F450 est un modèle de quadricoptère largement utilisé et apprécié dans le domaine des drones. Sa conception simple mais robuste en fait un choix populaire parmi les amateurs de drones et les professionnels. Le cadre F450 est composé principalement de fibre de carbone ou de matériaux composites renforcés (Fig. V.1), offrant un équilibre optimal entre légèreté et durabilité. (Faiyaz et al., 2020)



Figure V.1 : Châssis quadrirotor F450 avec PDB intégré.
(https://queenhobby.com/PD710574-f450_quad_copter_frame.html)

V.1.1.2 Caractéristiques du châssis F450 :

Les principales caractéristiques du cadre F450 incluent :

- **Dimensions** : Avec un diamètre de 495 mm, il offre une bonne stabilité en vol tout en étant assez compact pour faciliter le transport et le stockage (Fig. V.2).
- **Structure** : Il se compose de quatre bras montés sur une plaque centrale supérieure et inférieure. Les bras sont souvent en fibre de carbone, ce qui les rend résistants tout en étant légers.
- **Poids** : Le cadre nu pèse environ 300 à 400 grammes, ce qui permet l'ajout de composants supplémentaires sans compromettre la maniabilité.

Compatibilité : Le cadre F450 est compatible avec une large gamme de moteurs, contrôleurs de vol et autres composants électroniques, offrant ainsi une grande flexibilité pour la personnalisation du drone. (Bird, 2019).

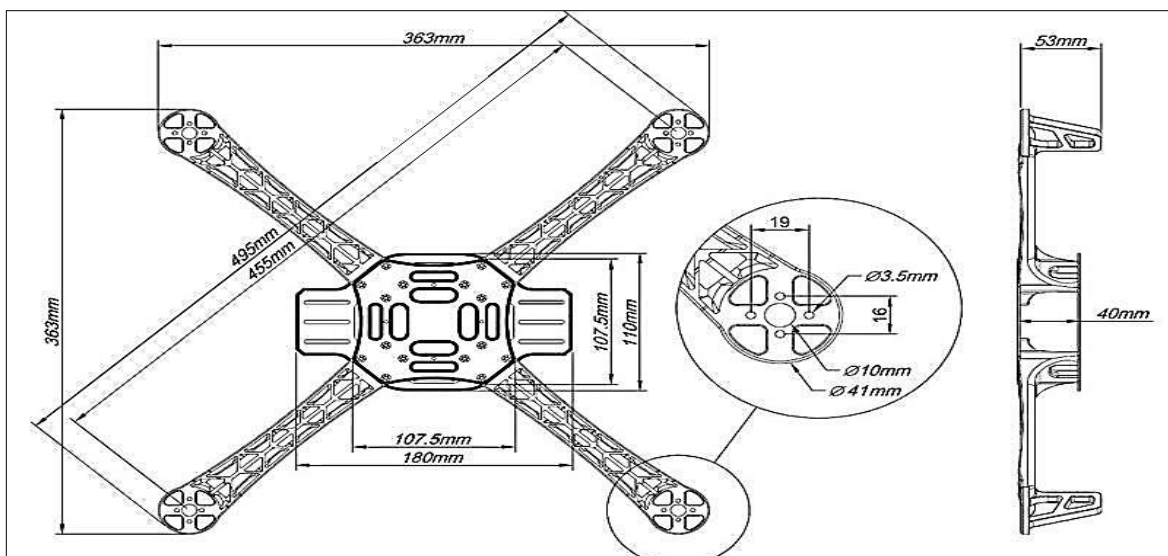


Figure V.2 : Dimensions du châssis F450.
(<https://www.pinterest.fr/pin/609815605769034513/>)

V.1.1.3 Importance du châssis F450 :

Le châssis F450 joue un rôle important dans la conception et les performances globales du quadricoptère. Voici quelques raisons pour lesquelles le cadre F450 est important :

- **Robustesse et durabilité** : La construction solide en fibre de carbone ou en matériaux composites permet au cadre de résister aux chocs et aux conditions de vol difficiles. Cette robustesse est essentielle pour des missions exigeantes, telles que la bathymétrie, où le drone peut être exposé à des environnements variés.
- **Stabilité en vol** : Grâce à sa conception équilibrée, le châssis F450 offre une excellente stabilité en vol. Cette stabilité est très importante pour obtenir des données précises lors de l'utilisation de capteurs ultrasons pour la bathymétrie, car elle minimise les vibrations et les mouvements indésirables.
- **Facilité d'assemblage et de maintenance** : La conception modulaire du châssis permet un assemblage rapide et facile, facilitant ainsi les réparations et les modifications ultérieures. Cette facilité d'assemblage est particulièrement bénéfique pour les utilisateurs qui doivent adapter ou améliorer leur drone en fonction des besoins de la mission.
- **Polyvalence** : Le châssis F450 est très polyvalent et peut être utilisé pour diverses applications, y compris la photographie aérienne, la surveillance environnementale, et les missions de recherche et de sauvetage. Cette polyvalence en fait un choix idéal pour les projets nécessitant une adaptabilité et une flexibilité accrues.
- **Accessibilité** : Le châssis F450 est largement disponible et relativement abordable, ce qui le rend accessible pour des projets de recherche, des applications commerciales et des loisirs. Son coût efficace permet de réaliser des projets innovants sans nécessiter de budgets exorbitants. (Faiyaz et al., 2020)

V.1.1.4. Application spécifique dans le projet

Dans le cadre de notre projet, le châssis F450 sera utilisé pour concevoir un quadricoptère destiné à la bathymétrie, équipé d'un capteur à ultrasons attaché par un fil. Les caractéristiques robustes et stables du châssis F450 en font le choix idéal pour cette application, assurant des mesures précises et fiables des profondeurs des plans d'eau et les niveaux bathymétriques. De plus, la compatibilité du cadre avec divers composants électroniques permettra d'intégrer facilement le capteur et les autres équipements nécessaires pour la mission bathymétrique.

V.1.2 Logiciels nécessaires pour la conception du châssis F450 :

Pour la conception, l'optimisation et la validation du cadre F450 d'un quadricoptère, plusieurs logiciels spécialisés sont indispensables. Ces outils permettent de créer des modèles précis, de simuler des conditions réelles et d'analyser les performances structurelles. (Satla et Bendine, 2023)

V.1.2.1 SolidWorks :

Est un logiciel de conception Assistée par ordinateur (CAO) largement utilisé pour la modélisation 3D. Il offre une suite complète d'outils pour créer, simuler et optimiser des pièces et des assemblages complexes (Fig. V.3).

- **Modélisation 3D** : SolidWorks permet de créer des esquisses 2D qui peuvent être extrudées, coupées et transformées en modèles 3D détaillés ;
- **Assemblage** : Les différents composants du cadre F450 peuvent être assemblés virtuellement, ce qui facilite la vérification des ajustements et des alignements ;
- **Simulation** : SolidWorks simulation module permet d'effectuer des analyses de contraintes, des tests de résistance et des simulations dynamiques pour évaluer les performances structurelles ;
- **Optimisation** : Les outils d'optimisation de SolidWorks permettent d'affiner la conception pour minimiser le poids tout en maximisant la résistance et la durabilité.

V.1.2.2 AutoCAD :

L'AutoCAD est un autre logiciel de CAO qui peut être utilisé en complément de SolidWorks pour des besoins spécifiques de dessin technique et de modélisation 2D et 3D (Fig. V.3).

- **Dessin technique** : AutoCAD excelle dans la création de dessins techniques précis, nécessaires pour la fabrication et l'assemblage des pièces.
- **Interopérabilité** : Les fichiers créés dans AutoCAD peuvent être importés dans SolidWorks pour une modélisation 3D détaillée et des simulations supplémentaires.

V.1.2.3 Cura ou Simplify3D :

Cura et Simplify3D sont des logiciels de tranchage (slicing) pour l'impression 3D. Ils transforment les modèles 3D en instructions spécifiques pour les imprimantes 3D (Fig. V.3).

- **Préparation des fichiers STL** : Ces logiciels permettent de préparer les fichiers STL des composants du cadre F450 pour l'impression 3D.
- **Paramètres d'impression** : Ils offrent des paramètres détaillés pour ajuster la qualité d'impression, la densité de remplissage, et les supports nécessaires.
- **Prévisualisation** : Cura et Simplify3D permettent de prévisualiser le processus d'impression pour s'assurer que les pièces seront imprimées correctement.

V.1.2.4 Fusion 360 :

Est un logiciel de CAO basé sur le cloud qui combine la conception industrielle et mécanique, la simulation, la collaboration et l'usinage (Fig. V.3).

- **Modélisation paramétrique** : Fusion 360 offre des capacités avancées de modélisation paramétrique pour créer des conceptions adaptables et modifiables facilement.
- **Simulation et animation** : Il permet de simuler le fonctionnement des mécanismes et d'animer les assemblages pour visualiser le comportement des composants en mouvement.
- **Collaboration en temps réel** : Grâce à sa plateforme cloud, Fusion 360 permet une collaboration en temps réel, facilitant le travail d'équipe et la gestion des versions.

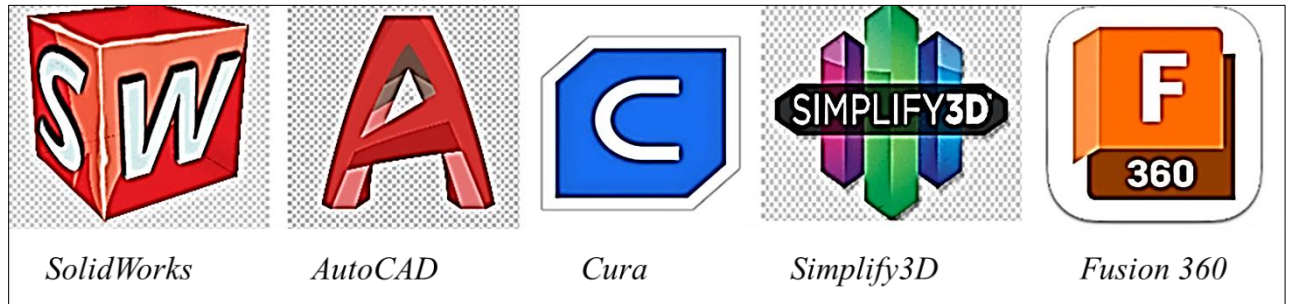


Figure V.3 : Icones des logiciels utilisés.

V.1.3 Conception des composants du Châssis :

Dans cette section, nous détaillons les étapes de conception des différents composants du châssis F450 en utilisant SolidWorks version 2011 SP0. Chaque pièce est conçue avec soin pour assurer la solidité, la légèreté et la compatibilité nécessaire à l'assemblage final du quadricoptère. (Faiyaz et al., 2020)

V.1.3.1 Conception des bras :

La conception des bras du quadricoptère dans SolidWorks nécessite une approche méthodique, combinant la création d'esquisses précises, la modélisation 3D, l'optimisation géométrique et la validation par des simulations et des tests. En suivant ces étapes :

- **Création des esquisses** : nous sélectionnons un plan de référence approprié (par exemple, le plan supérieur). Ensuite, on utilise les outils de dessin 2D de SolidWorks pour créer le contour du bras, incluant les formes nécessaires pour les points de fixation des moteurs et de la plaque centrale. On applique des cotes précises pour définir les dimensions critiques du bras, en s'assurant qu'elles correspondent aux spécifications du cadre F450.

Ainsi nous avons ajoutés les trous de montage pour les vices qui fixeront les bras à la plaque centrale et les moteurs aux bras. On ajoute des contours intérieurs ou des évidements pour alléger le bras sans compromettre sa résistance.

- **Extrusion et Modélisation 3D :**

Nous avons extrudé l'esquisse 2D pour créer une forme 3D de base du bras. Ensuite on définit la longueur d'extrusion selon l'épaisseur requise pour le bras, puis on sélectionne le

matériau approprié pour la simulation (par exemple, fibre de carbone ou plastique renforcé), ainsi on ajoute des renforts aux zones critiques du bras pour améliorer sa rigidité et sa résistance, puis on utilise des nervures et des entretoises intégrées dans la conception et en fin on utilise des évidements stratégiquement placés pour réduire le poids du bras sans compromettre sa robustesse (Fig. V.4).

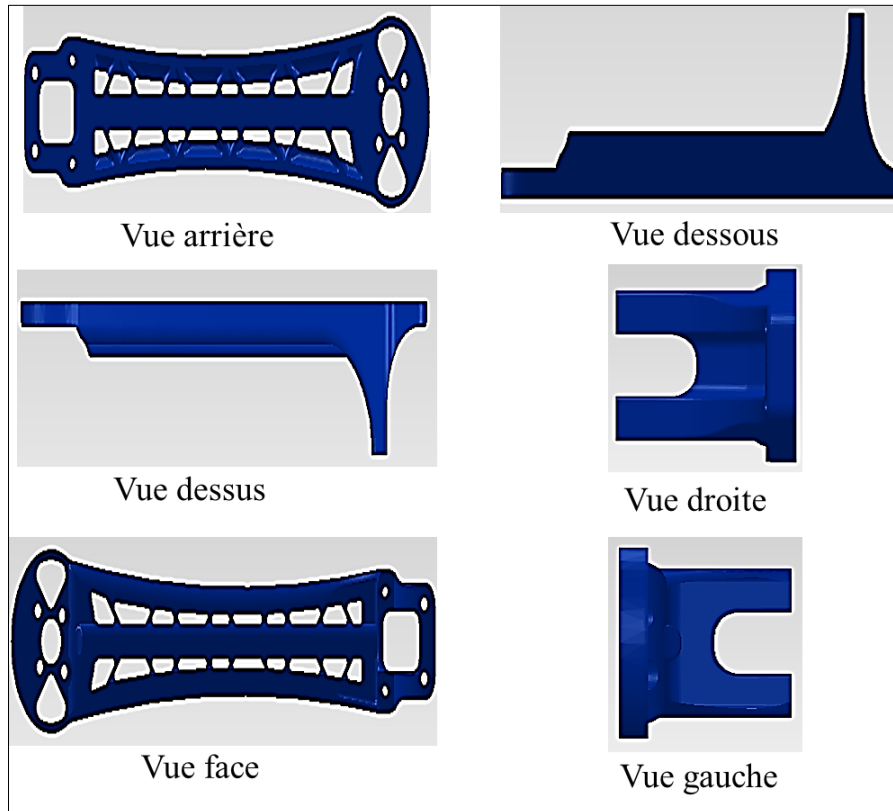


Figure V.4 : Conception des bras.

V.1.3.2. Conception de la plaque centrale supérieure :

La plaque centrale supérieure sert de support principal pour la fixation des différents composants du quadricoptère. Elle connecte les bras du quadricoptère, assurant ainsi une répartition uniforme des charges et des forces subies pendant le vol (Fig. V.5).



Figure V.5 : Plaque centrale supérieure

V.1.3.3 Conception de la plaque centrale inférieure :

La plaque centrale inférieure est une composante essentielle du cadre d'un quadricoptère. Elle constitue la partie inférieure de la structure principale du drone, positionnée directement en dessous de la plaque centrale supérieure. Elle est généralement fabriquée à partir de matériaux robustes et légers tels que la fibre de carbone, l'aluminium ou des composites plastiques renforcés, pour assurer une combinaison optimale de résistance et de légèreté (Fig. V.6).

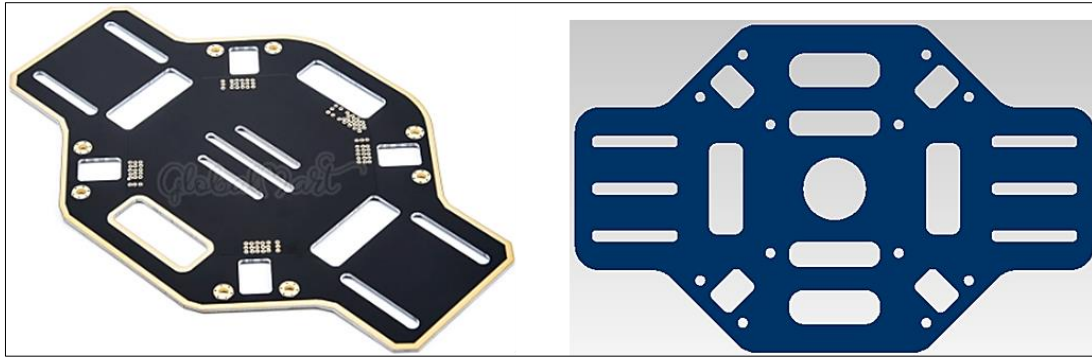


Figure V.6 : Plaque centrale inférieure

V.1.3.4 Conception des pieds du quadricoptère :

Les pieds du quadricoptère, également appelés trains d'atterrissage, sont des composants essentiels situés à la base du drone (Fig. V.7). Leur principal rôle est de permettre un atterrissage stable et en douceur, en protégeant les composants sensibles du quadricoptère, comme les capteurs, les caméras et l'électronique embarquée. La conception des pieds doit prendre en compte plusieurs facteurs, tels que la durabilité, le poids, la stabilité et l'absorption des chocs.

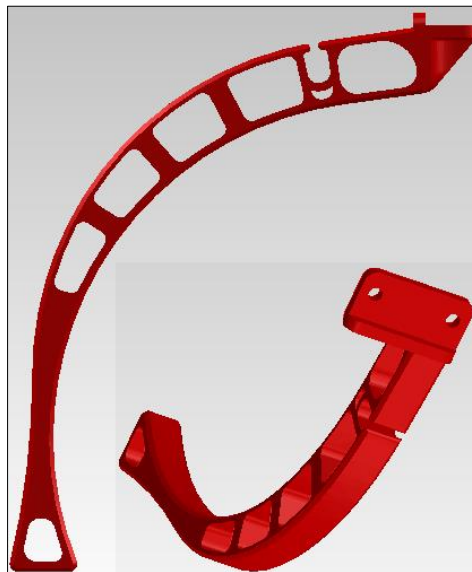


Figure V.7: Pied du châssis F450.

V.1.4. L'assemblage des composants :

L'assemblage des composants dans SolidWorks est une étape essentielle dans la création d'un modèle 3D complet et fonctionnel (Fig. V.8). Le processus d'assemblage comprend les étapes suivantes :

- Ouvrir un nouveau fichier d'assemblage dans SolidWorks. Ensuite, importer chacun des composants à assembler dans le modèle. Ces composants peuvent être des pièces individuelles créées précédemment (les bras, les plaques, les pieds, etc.) ;
- Ordonner dans l'assemblage en fonction de leur position et de leurs relations avec les autres pièces. SolidWorks offre différents outils pour faciliter ce processus, comme l'alignement automatique, les contraintes de positionnement, et les relations géométriques ;
- Ajouter des contraintes pour fixer les pièces ensemble de manière appropriée. Ces contraintes peuvent être des contraintes de contact, des contraintes d'alignement, des contraintes de coincement, ou d'autres types de relations qui définissent comment les pièces s'emboîtent les unes dans les autres ;
- Ajuster les dimensions ou la géométrie des pièces pour garantir un ajustement précis, si nécessaire.
- Vérifier l'ensemble du modèle pour détecter d'éventuels conflits ou interférences. SolidWorks propose des outils d'analyse de collision qui permettent de détecter et de résoudre ces problèmes rapidement.
- Ajouter des détails supplémentaires à l'assemblage, tels que des vis, des écrous, des joints, ou d'autres composants de fixation. Une fois que l'assemblage est complet, on peut créer des dessins techniques, des rendus, ou des animations pour documenter et visualiser notre travail.



Figure V.8 : Assemblage des composants du quadricoptère.

V.2. Conception des autres composantes utilisées dans notre appareil :

V.2.1. Contrôleur de vol :

Le Pixhawk 2.4.8 est un contrôleur de vol open-source conçu pour contrôler divers types de plateformes robotiques et drones, notamment voilures fixes, multicopters, VTOL, hélicoptères, rovers, drones de surface, et sous-marins (Fig. V.9).

Il a été développé par la communauté Pixhawk en collaboration avec 3DRobotics et est financé par cette dernière. Le Pixhawk est connu pour ses caractéristiques de sécurité élevées, de modularité, et de flexibilité, ce qui en fait un choix idéal pour les développeurs, les chercheurs, et les amateurs. (<https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html>)

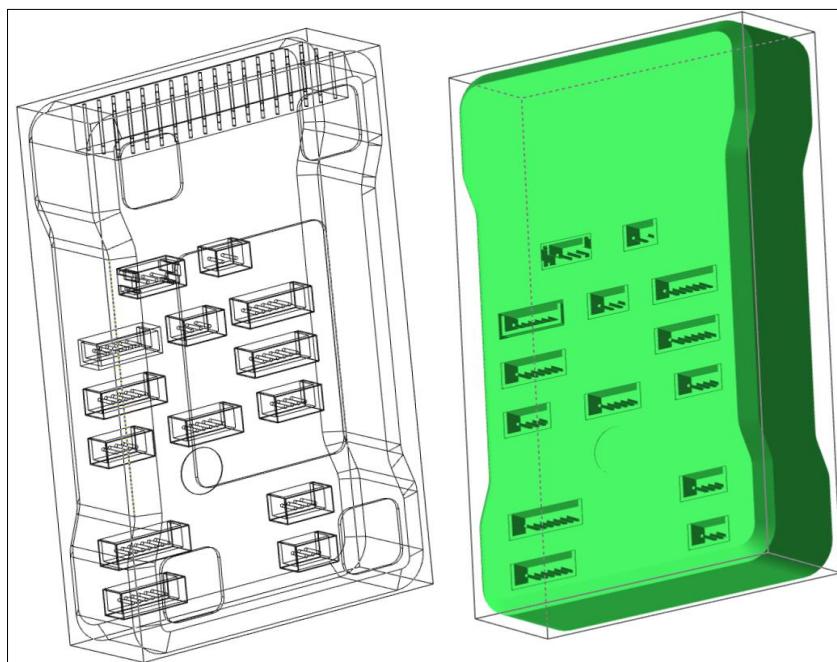


Figure V.9 : Pixhawk 2.4.8 en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks

V.2.2. Raspberry Pi :

Le Raspberry Pi est une série de petits ordinateurs mono-carte conçus par la fondation Raspberry Pi (organisme britannique à but non lucratif). Le Raspberry Pi a été créé pour promouvoir l'apprentissage de la programmation informatique et de la technologie numérique, en particulier dans les écoles et les communautés en développement (Fig. V.10).

Le Raspberry Pi a été conçu en 2006 par des professeurs de l'université de Cambridge, vise à démocratiser l'accès aux ordinateurs et au *digital making* (capacité de résolution de problèmes et compétences techniques et informatiques) en offrant des ordinateurs à faible coût et des logiciels libres. (Nuttall, 2021)

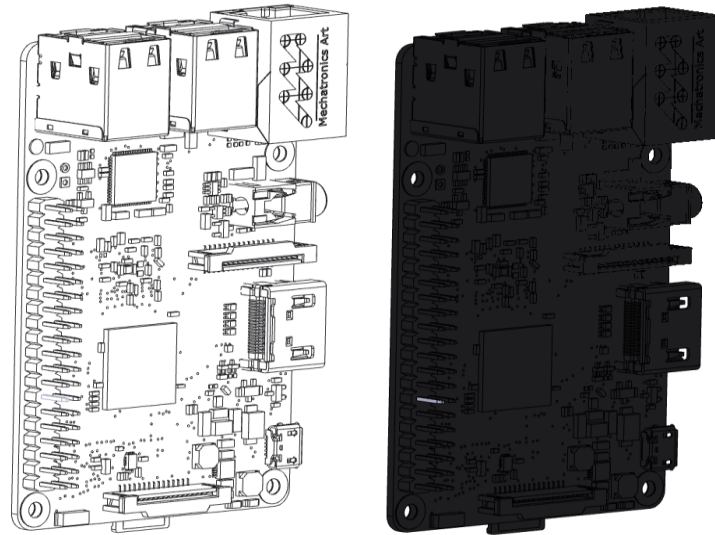


Figure V.10 : Raspberry-Pi en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks

V.2.3. Brushless Motors :

Un moteur brushless DC (BLDC) pour drone est un type de moteur électrique qui utilise une alimentation en courant direct (DC) (Fig. V.11) et un contrôleur électronique pour commuter les courants dans les bobinages du stator, créant des champs magnétiques qui suivent le rotor permanent. (Jalu et al., 2019)

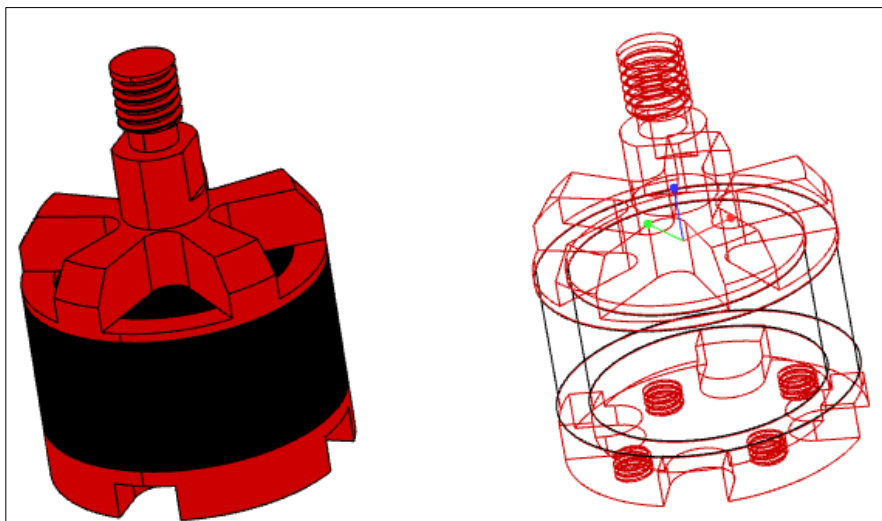


Figure V.11 : Brushless DC Motor en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks.

V.2.4. Hélice :

Un propeller, également connu sous le nom d'hélice, est un élément clé d'un quadricoptère, qui joue un rôle essentiel dans sa performance de vol (Fig. V.12). C'est une pale rotative attachée aux moteurs du drone, qui assure la portance et la propulsion requises pour le vol. L'objectif des propellers est de transformer la puissance mécanique du moteur en poussée, ce

qui permet au quadricoptère de monter, descendre et se déplacer dans diverses directions.(Ning et al., 2017).

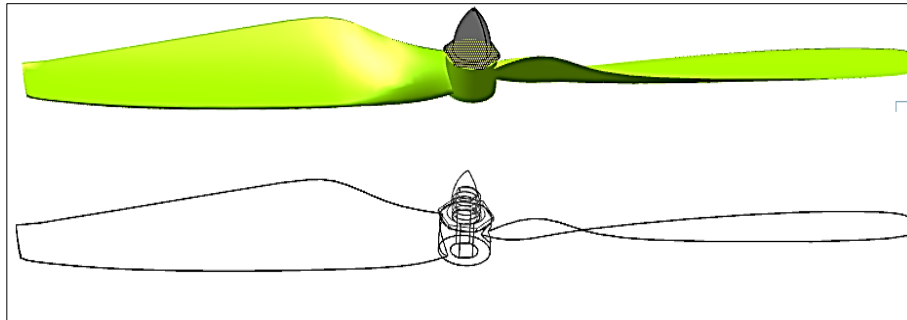


Figure V.12 : Hélice en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks.

V.2.4. GPS :

Le GPS (Global Positioning System) est un système de navigation par satellite qui permet de déterminer la position géographique précise d'un objet n'importe où sur la Terre (Fig. V.13). Dans le contexte d'un quadricoptère, un module GPS est un dispositif électronique intégré qui reçoit des signaux de satellites GPS et calcule les coordonnées géographiques du drone en temps réel. La modélisation d'un module GPS dans SolidWorks implique la création d'un modèle 3D détaillé qui peut être intégré dans le design global de drone. (Dlnya et al., 2020)



Figure V.13 : Module GPS en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks.

V.2.5 ECT400 :

L'échosondeur ECT400 est un sonar compact de haute précision, idéal pour les applications de bathymétrie lorsqu'il est monté sur un drone quadricoptère. Ce dispositif permet de mesurer la profondeur de l'eau et de collecter des données de rétrodiffusion avec une grande précision, même dans des environnements aquatiques complexes (Fig. V.14, V.15).

L'ECT400 permet de mesurer avec précision la profondeur de l'eau et la topographie sous-marine en collectant des données de rétrodiffusion en temps réel, capable de mesurer des profondeurs allant jusqu'à 100 mètres, avec des options pour des profondeurs plus importantes disponibles. Cette fonctionnalité est très importante pour les levées bathymétriques dans les barrages, où la connaissance précise de la profondeur de l'eau et de la topographie sous-

marine est essentielle pour leurs gestions et maintenances.
(<https://www.echologger.com/products/single-frequency-echosounder-deep>)

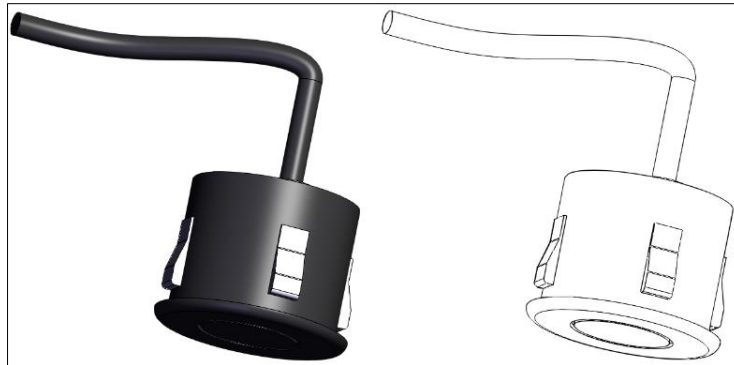


Figure V.14 : Echosondeur ECT400 en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks.

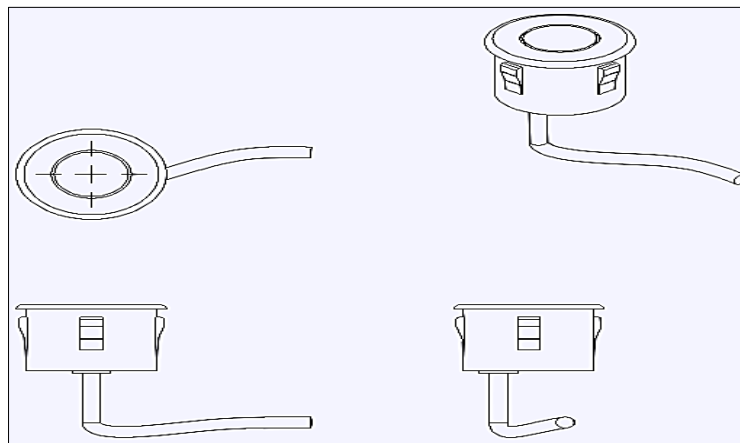


Figure V.15 : Echosondeur ECT400 en mode de rendu (filaire + ombré) dans SolidWorks.

V.3 Mission d'un quadricoptère dans un barrage

Dans cette partie, nous examinerons de plus près le rôle des drones quadricoptères dans la collecte de données géo-spatiales pour la gestion des barrages réservoirs. Nous explorerons les avantages de cette approche, les défis potentiels et les implications pour la gestion durable des ressources hydriques. En mettant en lumière les capacités et les applications des drones quadricoptères dans ce domaine, nous illustrerons leur importance croissante dans la surveillance environnementale et la préservation des infrastructures hydrauliques.

V.3.1 Préparation de la mission :

La préparation de la mission pour collecter des données dans un barrage consiste en un processus méthodique visant à planifier et à organiser les activités nécessaires pour effectuer une collecte de données efficace et sécurisée à l'aide d'un drone quadricoptère. Cette phase de préparation implique une série d'étapes stratégiques visant à définir les objectifs de la mission, à évaluer les conditions environnementales et à sélectionner les équipements et les stratégies de vol appropriés.

En d'autres termes, la préparation de la mission vise à garantir que toutes les exigences opérationnelles, logistiques et réglementaires sont prises en compte avant le déploiement du

drone. Cela inclut la définition des objectifs spécifiques de la mission, l'évaluation des risques potentiels, la sélection des équipements et des capteurs appropriés, ainsi que la planification détaillée des itinéraires de vol et des procédures de sécurité.

L'objectif ultime de la préparation de la mission est d'assurer le succès de la collecte de données tout en minimisant les risques pour le personnel, le matériel et l'environnement.

V.3.2 Planification des itinéraires de vol :

La planification des itinéraires de vol est un processus stratégique visant à déterminer les trajectoires de vol optimales pour les drones. Cette planification implique l'établissement de routes spécifiques que le drone suivra lors de sa mission, en tenant compte de divers facteurs tels que les objectifs de la mission, les contraintes environnementales, les réglementations aériennes et la sécurité des opérations. (Huard et al., 2009)

Pour la planification des itinéraires de vol, il existe plusieurs logiciels spécialisés utilisés par les opérateurs de drones. Ces logiciels offrent des fonctionnalités avancées pour créer, visualiser et analyser des itinéraires de vol, en tenant compte de divers facteurs tels que les conditions météorologiques, les restrictions de l'espace aérien, les obstacles et les objectifs de la mission. Nous citons les logiciels les plus utilisés comme : *DJI FlySafe*, *Mission Planner*, *QGroundControl*, *Pix4Dcapture* et *Kittyhawk* (Fig. V.16).

On a utilisé le logiciel QGroundControl pour planifier l'itinéraire de vol dans la retenue du barrage de Beni Haroun (exemple de cas) (Fig. V.17).



Figure V.16: Icône des logiciels de planification des itinéraires de vol.



Figure 4 Exemple de planification des itinéraires de vol dans le réservoir du barrage de Beni haroun avec QGroundControl.

V.3.3 Vérification des conditions météorologiques :

La vérification des conditions météorologiques est une étape très importante de la préparation de la mission pour collecter des données dans un barrage à l'aide d'un drone quadricoptère. Cette vérification vise à évaluer les conditions atmosphériques actuelles et prévues afin de garantir la sécurité et la faisabilité de l'opération de vol.

Le vent et la pluie sont des facteurs limitant en drone. Pour le vent, c'est plus particulièrement le cas en bord de mer. Un drone est conçu pour voler jusqu'à certaines limites météorologiques, données par le fabricant : sans pluie, vitesse de vent limite (20 km/h représentent déjà un vent important pour un quadricoptère) (Fig. V.18), fourchette de températures...etc. Au-delà des limites prévues, le risque de crash est plus important, que cela soit en vol et à l'atterrissage.

Une bonne préparation des missions en drone passe par la consultation des prévisions météorologiques afin d'anticiper les changements des conditions de vols.

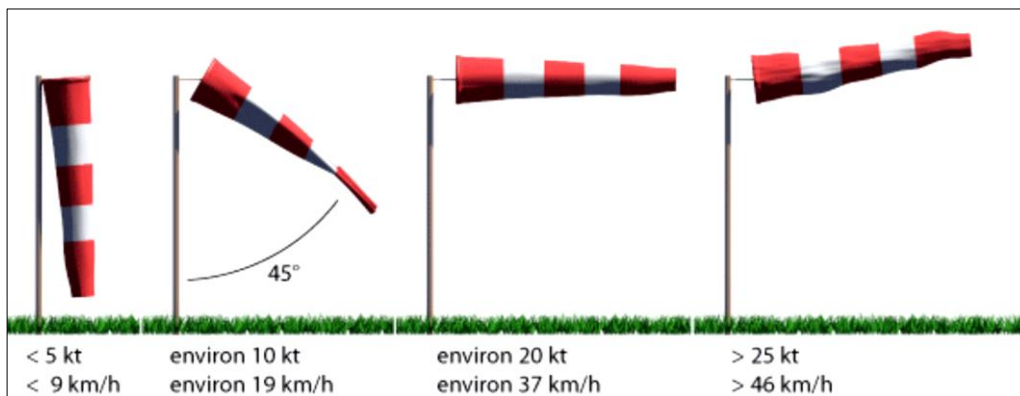


Figure V.18 : La manche à air réglementaire.

(<http://passionduciel.wifeo.com/documents/cours-meteo-2-du-09-02-2018.pdf>)

V.3.4 Collecte des données géo-spatiales :

La collecte des données géo-spatiales est une étape essentielle dans la mission d'un quadricoptère dans un barrage réservoir. Cette phase implique l'utilisation des capteurs embarqués pour recueillir des informations géographiques précises et détaillées sur la zone cible, notamment la latitude, la longitude et la profondeur des eaux.

- *Déploiement du quadricoptère* : Une fois que la planification de la mission et la vérification des conditions météorologiques sont terminées, le quadricoptère est déployé dans la zone de vol prévue, en suivant les itinéraires de vol préalablement définis ;
- *Activation des capteurs* : Les capteurs embarqués, tels que les capteurs ultrasoniques pour la mesure de la profondeur, sont activés pour commencer à recueillir des données dès que le quadricoptère est en vol et positionné au-dessus de la zone d'intérêt ;
- *Collecte des données* : Le quadricoptère vole selon un plan de vol préétabli, collectant des données géo-spatiales à des emplacements spécifiques tout au long de sa trajectoire.

Les capteurs enregistrent les informations telles que la position GPS, l'altitude et d'autres données pertinentes à intervalles réguliers ;

- *Transmission des données* : Les données collectées sont transmises en temps réel vers une station au sol ou stockées à bord du quadricoptère pour être téléchargées ultérieurement. La transmission en temps réel permet une surveillance continue de la qualité des données et des performances du quadricoptère ;
- *Surveillance de la mission* : Pendant toute la durée de la mission, les opérateurs surveillent attentivement les paramètres de vol, les données collectées et les conditions environnementales pour garantir le bon déroulement de l'opération ;
- *Vérification de la qualité des données* : Une fois la mission terminée, les données collectées sont analysées pour s'assurer de leur qualité et de leur fiabilité. Des outils de traitement et d'analyse des données peuvent être utilisés pour visualiser, interpréter et extraire des informations à partir des données brutes.

Après la collecte des données, un aperçu des données pourrait être affiché dans un tableau présentant plusieurs cases, chacune représentant une entrée de données (Tableau IV.1).

- Numérotation: Un numéro unique attribué à chaque entrée de données pour faciliter l'identification et la référence ultérieure ;
- Date: La date à laquelle les données ont été collectées, indiquant le jour de l'observation ;
- Heure: L'heure à laquelle les données ont été enregistrées, permettant de préciser le moment de l'observation ;
- Latitude: La latitude géographique de l'emplacement où les données ont été collectées, exprimée en degrés, minutes et secondes ou en décimales ;
- Longitude: La longitude géographique de l'emplacement où les données ont été collectées, exprimée en degrés, minutes et secondes ou en décimales ;
- Élévation: L'élévation géographique de l'emplacement où les données ont été collectées, indiquant la hauteur par rapport au niveau moyen de la mer ou à un autre point de référence ;
- Profondeur de l'eau: La profondeur de l'eau à l'emplacement spécifié, mesurée depuis la surface de l'eau jusqu'au fond du réservoir, généralement exprimée en mètres ;

ID	Date	Heure	Latitude	Longitude	Élévation (m)	Profondeur (m)
1	YYYY-MM-DD	HH:MM:SS	00.00000	00.00000	100	10
2	YYYY-MM-DD	HH:MM:SS	00.00000	00.00000	102	12
3	YYYY-MM-DD	HH:MM:SS	00.00000	00.00000	98	8
4	YYYY-MM-DD	HH:MM:SS	00.00000	00.00000	99	9

5	YYYY-MM-DD	HH:MM:SS	00.00000	00.00000	101	11
---	------------	----------	----------	----------	-----	----

- *Atterrissage en toute sécurité du quadricoptère* : L'atterrissage en toute sécurité du quadricoptère se réfère au processus de ramener le drone quadricoptère au sol de manière contrôlée, sans dommages pour le drone, son environnement ou les personnes et objets environnants. Cela implique de prendre les mesures nécessaires pour garantir que le drone se pose en douceur et en toute sécurité, en minimisant les risques d'accidents ou de dommages.

Conclusion

La conception d'un quadricoptère bathymétrique est un domaine fascinant et important qui combine l'aéronautique, la robotique et l'hydrographie. Un quadricoptère bathymétrique est un drone équipé de capteurs spécifiques pour mesurer la profondeur des plans d'eau et cartographier les fonds marins ou lacustres. La conception et l'assemblage d'un quadricoptère demandent une approche rigoureuse et méthodique, intégrant des connaissances approfondies en ingénierie et une maîtrise des outils de CAO comme SolidWorks.

La réussite de cette tâche complexe dépend de la précision dans chaque étape du processus, assurant ainsi un drone performant, fiable et adapté à des applications diverses, telles que la bathymétrie par capteur ultrason. La conception d'un quadricoptère bathymétrique nécessite une approche intégrée, tenant compte des contraintes aérodynamiques, de la stabilité en vol, de la résistance aux environnements humides, et de la capacité à collecter et traiter des données de haute qualité.

Chapitre VI

CHAPITRE VI: ESTIMATION DE L'ENVASEMENT PAR BATHYMÉTRIE, CAS DU BARRAGE DE BENI HAROUN

Introduction

La cartographie et la modélisation bathymétrique sont essentielles pour une gestion efficace et une analyse approfondie des environnements aquatiques, notamment dans le contexte des réservoirs et des barrages. Ces techniques permettent de représenter de manière précise et détaillée la topographie sous-marine, fournissant des informations cruciales pour diverses applications en hydrologie, génie hydraulique, et gestion des ressources en eau.

Dans ce chapitre, nous avons utilisé des données bathymétriques obtenues auprès de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) pour quantifier les sédiments accumulés dans la retenue du barrage de Beni Haroun durant la période 2003 - 2013. Nous aborderons les défis rencontrés lors de l'utilisation des logiciels SIG (ArcGIS, QGIS) et les solutions mises en œuvre pour surmonter ces obstacles afin de produire des cartes topographiques et bathymétriques de haute précision.

VI.1 Généralités sur la région d'étude :

VI.1.1 Situation géographique :

Le barrage de Béni-Haroun est situé sur l'oued El Kabîr dans la wilaya de Mila (Est-Algérien). Il est alimenté par l'Oued Rhumel et l'Oued-Endja, Le bassin versant du Béni-Haroun est situé en grand partie sur le versant méridional du bombement tellien. Il fait partie du grand bassin Kabîr-Rhumel avec une superficie de 6595 Km². Ce bassin est limité naturellement par les limites du Kébir-Rhumel qui sont : au Nord par les bassins des côtières constantinois Ouest et Constantinois Centre (BV n°03) ; au Sud, le bassin versant des hauts plateaux Constantinois (BV n°07) ; à l'Ouest le bassin de Soummam (BV n°15) et à l'Est le bassin de Seybouse (BV n°14). (Figure VI.1) (Chebbah et Kabour, 2023)

L'ouvrage est de type poids rectiligne, en BCR (Béton Compacté au Rouleau), avec une longueur en crête de 710 m, arasée à la côte 216,3 m, une hauteur d'ordre de 118 m au-dessus des fondations. Le lac de la retenue épouse la partie captée de l'Oued El Kabîr et les deux vallées de l'Oued Rhumel et de l'Oued Endja, sur une surface de 39,29 Km², soit près de 4 000 ha. Le bilan pluie réservoir permet de déterminer un déstockage net par évaporation, équivalant à une tranche annuelle moyenne de 350 mm (Chebbah et Kabour, 2023 ; Boulaiche et Arous, 2015)

La retenue permet d'emmagasiner 963 Hm³ d'eau, soit un volume utile de 723 Hm³, elle permet de régulariser un apport annuel de 435 Hm³, avec une réserve de 1 milliard de m³ d'eau atteinte le 12 Février 2012. Le barrage a été mis en service en 2003 (la mise en eaux). (Chebbah et Kabour, 2023)

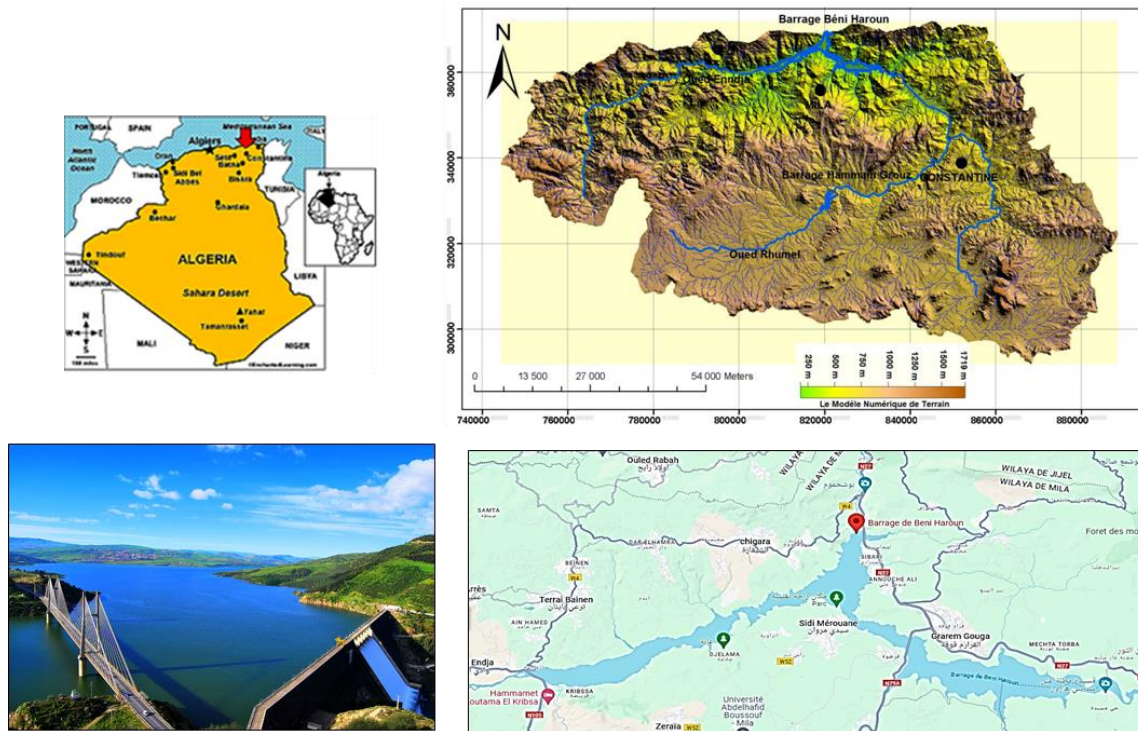


Figure VI.1 : Situation géographique du site d'étude.

VI.1.2 Aperçu Géologique :

La géologie locale s'inscrit dans un contexte tectonique complexe de chevauchements et de failles ou décrochements, caractérisé par des déformations plastiques (plissements) et cassantes (failles, fractures) des unités lithologiques du site. Ces unités sont constituées schématiquement d'une assise calcaire compétente (à comportement rigide – cassant) de 100 à 150 m d'épaisseur, encadrée par deux séries marneuses incompétentes (à comportement plastique - plissé - tectonisé) (Fig. VI.2). (ANBT, 2002)

Les calcaires, présentent une structure en synclinal, le barrage étant entièrement fondé sur le flanc Nord de celui-ci. Ce synclinal est évasé et à plan axial vertical plus ou moins ENE-WSW en rive droite, les couches plongeant de 40° vers le SSE au droit de l'ouvrage. Ces couches se redressent progressivement vers le centre de l'ouvrage (plongement toujours vers le SSE) puis les bancs s'incurvent en direction du SSW en rive gauche, leur plongement se redressant jusqu'à la verticale, pour basculer finalement vers l'WNW (flanc renversé) (Fig. VI.3). (ANBT, 2002)

Le site du barrage est approximativement à la cote 100 m sur l'Oued El Kébir à environ 3,5 km en aval de la confluence de l'Oued Rhumel et de l'Oued Endja. Un autre affluent, Oued El Dib, rejoint l'Oued El Kébir juste à l'amont du barrage. (ANBT, 2002)

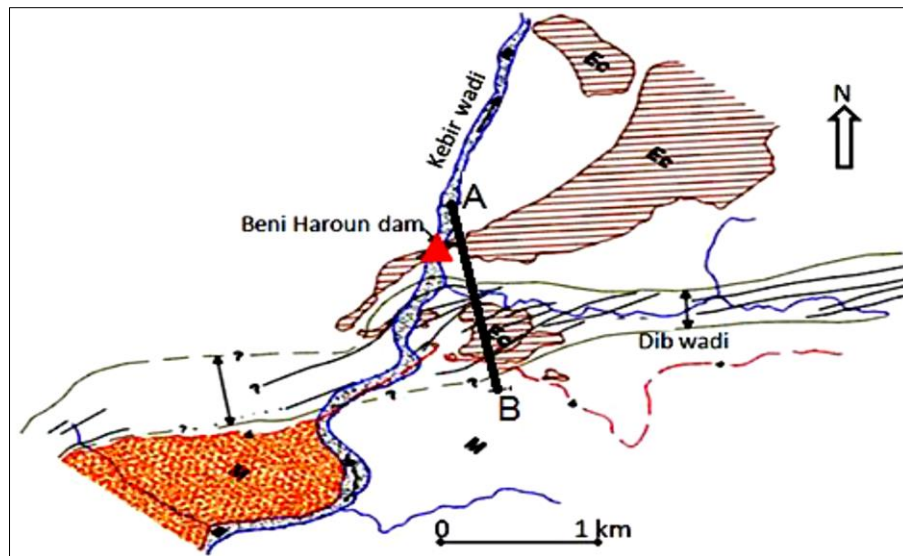


Figure VI.2. Géologie du site du barrage de Beni Haroun. (Harza, 1986, Chebbah et Kabour, 2023)

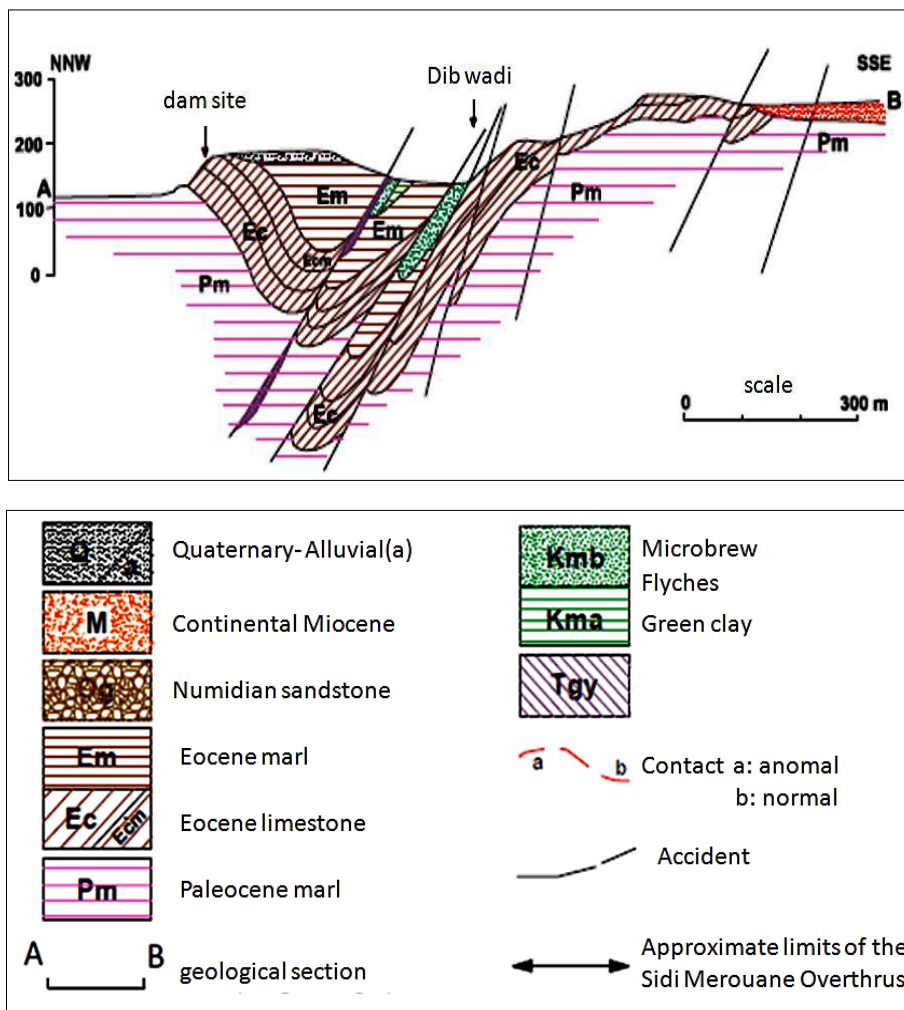


Figure VI.3. Coupe géologique du site de barrage de Beni Haroun. (Harza, 1986, Chebbah et Kabour, 2023)

VI.1.3 Aperçu Climatique et hydrologique :

Les données climatiques de la station de Béni-Haroun recueillies au près de l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (ANBT) totalisent 17 années (1998-2015) (Fig. VI.4 et 5). Les précipitations moyennes mensuelles interannuelles présentent une valeur maximale de 107 mm au mois de Décembre et 1.75 mm est une valeur minimale au mois de Juillet. Les mesures de la température moyenne mensuelle interannuelle montrent un maximum de 26.56 °C au mois de Juillet, et un minimum de 7.68 °C au mois de Janvier. (Chebbah et Kabour, 2023)

Les précipitations annuelles atteignent une valeur maximale égale à 924.6 mm aux années 2004/2005, et la précipitation la plus faible est enregistrée durant les années 2000/2001 avec une valeur minimale égale à 317.64 mm (Fig. VI.5). Les températures moyennes annuelles atteignent une valeur maximale égale à 17.91 mm aux années 2003/2004, et la précipitation la plus faible est enregistrée durant les années 2007/2008 avec une valeur minimale égale à 14.99 mm (Figure 3).

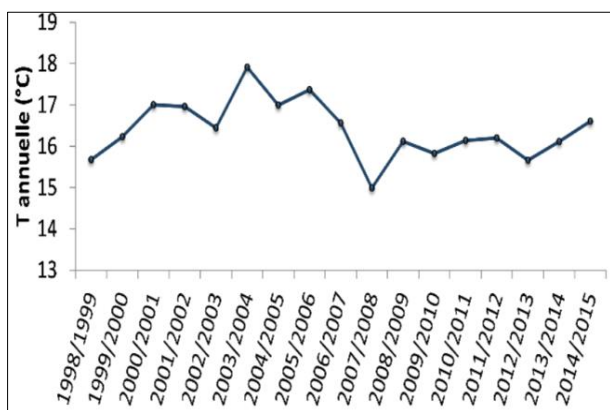


Figure VI.4. Graphe des températures moyennes annuelles de la station de Beni Haroun (1998-2015) (Chebbah et Kabour, 2024)

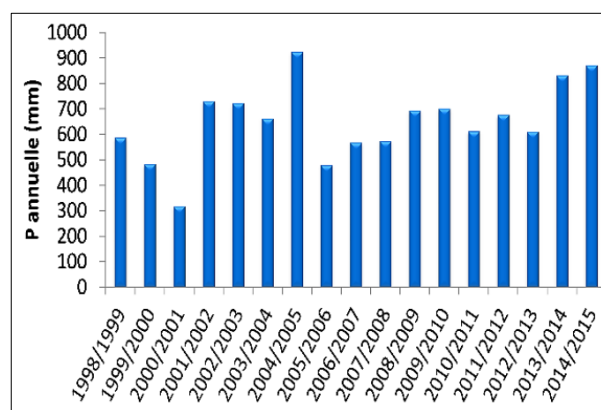
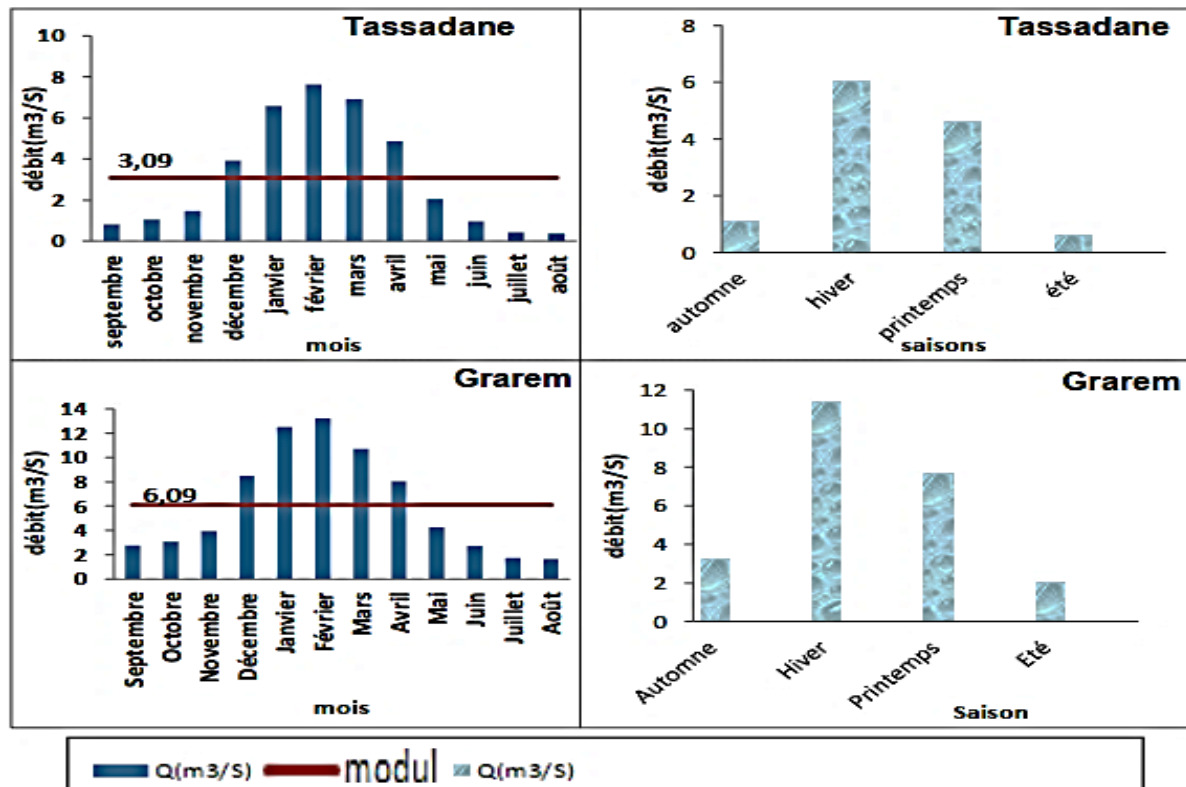


Figure VI.5. Graphe des précipitations annuelles de la station de Beni Haroun (1998-2015) (Chebbah et Kabour, 2024)

- **Crues et étiages** : Les fluctuations des apports des crues sont directement liées aux hauteurs de précipitations et leur répartition à travers les sous bassins. A la station de Tassadane, les épisodes pluvieux exceptionnels en 2002/03 ont engendré des crues conséquentes atteignant un pic de 609.4 m³/s, le 25 Janvier 2003 ; le volume total écoulé pendant 24 heures est de l'ordre de 21.66 hm³. L'année 1984/85 a connu des crues conséquentes au pic de 995 m³/an, le 18 Mars 1985, avec un volume journalier de l'ordre de 24.12 hm³. (Lakache H et Mebarki A, 2015)
- **Apports liquides** : Les variations mensuelles présentes un pic enregistré au mois de février, ce max atteint un ordre de 7,63 m³/s (Tassadane) et de 13,24 m³/s (Grarem), et un minimum de 0,38 m³/s au mois d'Aout au niveau de la station de Tassadane ; en tant que à la station de Grarem le minimum est près de 1,63 m³/s du même mois. La période des hautes eaux s'étend de Décembre jusqu'au Avril, elle est caractérisée par la situation de ces mois au-dessus de la valeur moyenne annuel du débit. Saisonnièrement, l'hiver est la saison la plus humide pour les deux stations avec un

max de 6,05 m³/s (Tassadane) et 11,42 m³/s (Grarem), en tant que la saison qui définit par sécheresse est celle de l'été par un débit min d'ordre de 0,59 m³/s (Tassadane) et d'ordre de 2,02 m³/s (Grarem) (Fig. VI.6) (Teffaha et Lakhal, 2016)



- Figure VI.6 Variation des débits mensuelle et saisonnière durant la période 1973-2011 des stations hydrométriques de Grarem et Tassadane (Teffaha et Lakhal, 2016)
- **Apports solides :** L'apport solide du bassin versant de l'oued Rhumel est de l'ordre 889 695 tonnes/an. La dégradation spécifique moyenne est de 167.7 t/km²/an. L'oued Endja supérieurement véhicule un apport solide annuel important, avec 740 157 tonnes/an, ce qui correspond à une dégradation spécifique remarquable de 789.9 t/km²/an. C'est une valeur 4 fois supérieure à celle observée sur le Rhumel à Grarem. Ainsi, la contribution de l'oued Endja à l'envasement du barrage de Béni Haroun est bien plus importante que celle du Rhumel. (Lakache H et Mebarki A, 2015)

VI.1.4 Caractéristiques techniques du barrage de Beni Haroun :

- **Retenue :**
 - Niveau normal (RN) : 200.00 m.
 - Niveau des plus hautes eaux (NPHE) : 214.18m.
 - Niveau minimum d'exploitation : 172.00 m.
 - Volume de la tranche morte (100-172) : 240 millions m³.
 - Volume utile (172-200) : 723 millions m³.
 - Volume total : 963 millions m³.

➤ **Barrage :**

- Type : barrage poids en béton compacté au rouleau (BCR).
- Hauteur maximale au-dessus du terrain naturel : 107 m.
- Hauteur maximale au-dessus des fondations : 118 m.
- Longueur en crête : 710 m.
- Largeur en crête : 8 m.
- Largeur maximale au niveau des fondations : 93 m.
- Fruit du parement amont : vertical.
- Fruit du parement aval : 0.8H/1V.
- Cote de la crête : 216.3 m

➤ **Evacuateur de crue** (Fig. VI.5) :

- Type : déversoir de surface à seuil libre-coursier et saut de ski.
- Localisation : partie centrale du barrage.
- Cote de la crête : 200 m.
- Cote du bac aval du saut de ski : variable de 124 m à 126 m.
- Longueur totale de l'évacuateur en crête : 124 m.
- Longueur de la cuillère : 130 m.
- Débit : 13230 m³/s.

➤ **Vidange de demi-fond :**

- Type : 2 puits blindés dans le corps du barrage avec un saut de ski
- Localisation : rive droite
- Calage de l'entrée : 140 m
- Section des puits : (3.0 m*4.10 m)*2.
- Vannes : 2 vannes Wagon à l'amont, 2 vannes segment à l'aval
- Débit maximal : 670 m³/s sous RN200.

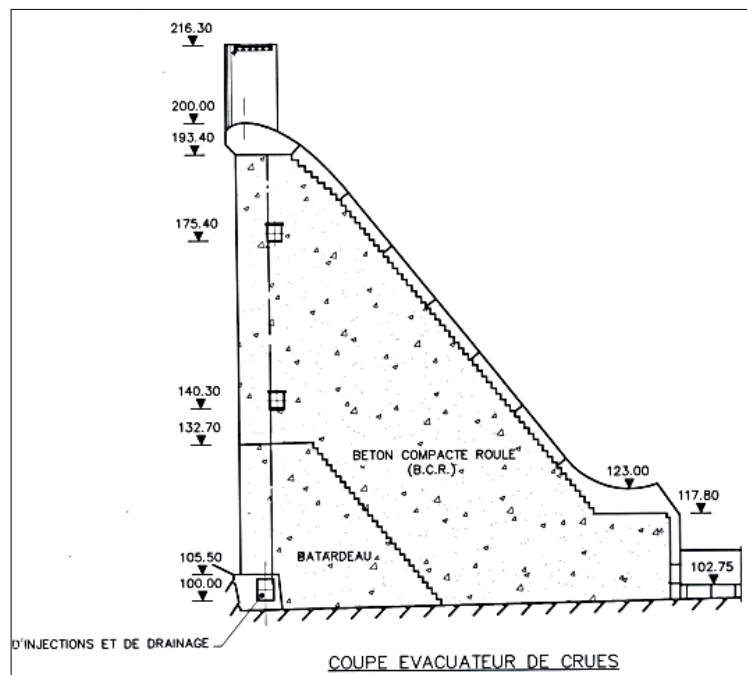


Figure VI.7 : Coupe évacuateur de crue du barrage de Beni Haroun (ANBT, 2002)

VI.2 Estimation de l'envasement par bathymétrie

La quantité de vase dans le lac du barrage de Beni Haroun sera calculée sur une période de 10 ans de la mise en eau en 2003 (avant la mise en eau) et 2013 (10 ans d'exploitation).

Par le manque de levé topographique du réservoir selon l'étude du barrage ; nous avons utilisé le modèle numérique de terrain pour l'année 2000 (période avant la mise en eau), où ce modèle sera adopté pour calculer le volume et la superficie du lac pour deux niveaux différents (NNR et NPHE),

Pour la période 2013, le volume et la surface du lac seront calculés sur la base des mesures bathymétriques effectuées par le Laboratoire d'études marines (LEM).

Enfin, les cartes d'élévation et les cartes bathymétriques seront étudiées afin de comprendre les changements et les développements les plus importants provoqués par l'envasement du fond du lac de barrage au cours de la période susmentionnée.

VI.2.1 Collecte des données :

Pour garantir une analyse intégrée et rigoureuse, cette partie s'appuie sur des données issues de sources variées et fiables.

- **Les données de l'ANBT :** Les mesures bathymétriques sont effectuées par le Laboratoire d'Études Maritimes (Hydra, Alger), l'étude, réalisée à la fin de l'année 2013, présente des tableaux détaillés incluent les altitudes, les superficies correspondantes et les volumes d'eau stockables.
- **Les données de Google Earth :** Nous extrayons les élévations de la retenue du barrage de Beni Haroun pour l'année 2000 à partir de Google Earth.
- **Model Numérique du Terrain :** Nous avons besoin d'une image MNT ainsi qu'une image GeoTIFF montrant les élévations du sol pour l'année 2000, qui correspond à la période précédant le début du remplissage du barrage de Beni Haroun, le site Web earthexplorer nous facilitera ce processus, (Figure VI.6) montre le processus de délimitation de la zone d'étude dans le but de télécharger le modèle numérique de terrain (MNT).



Figure VI.8 : Choix de la zone d'étude à l'aide de earthexplorer

VI.2.2 Préparation des données :

- **Positionnement des points sur le barrage :** On utilise le logiciel ArcGIS Pro 2.8 (version 2021) pour traiter les données d'élévation de l'année 2013, a pour objectif de préparer les données pour dessiner la carte topographique et la carte bathymétrique de la retenue du barrage. Ce processus implique un nombre considérable de points, atteignant un total de 180 784 points. Si l'on regarde les propriétés des points, on constate qu'ils n'ont pas de système de coordonnées. Il faut donc les définir selon le système global de Mercator, zone 32 Nord. On remarquera que les points de mesure de profondeur sont centrés sur la retenue du barrage. (Figure VI.7) montre comment les points correspondent à la carte globale de base du logiciel ArcGIS. Après cela, il faut interpoler les points en utilisant la méthode du krigeage qui utilise l'autocorrélation spatiale des données pour améliorer les estimations des points qui incluent l'élévation et la profondeur dans les zones vides.

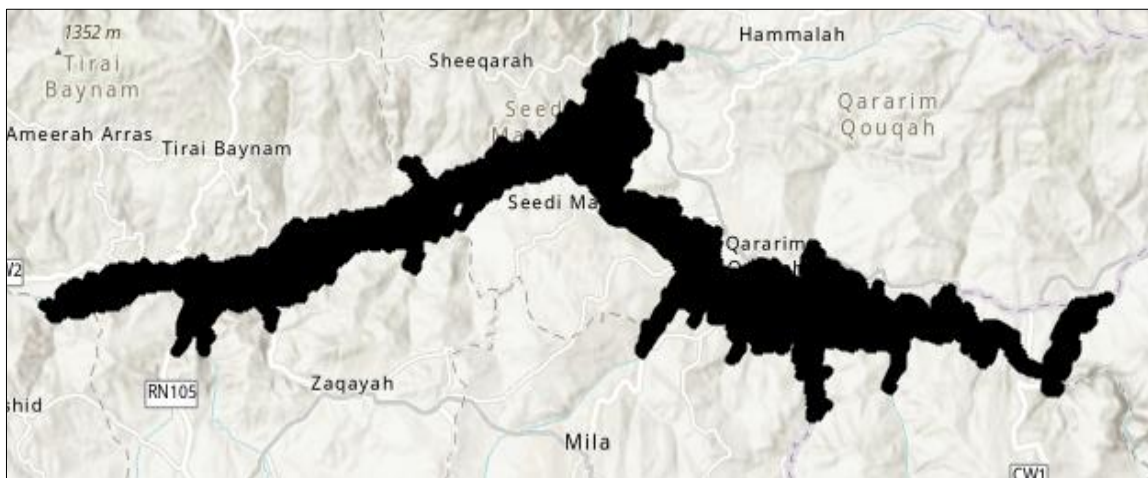


Figure VI.9 : Positionnement des points sur la retenue du barrage de Beni Haroun.

VI.2.3 : Calcul du volume du lac du barrage :

Le calcul du volume du lac de barrage de Beni Haroun en Algérie est d'une importance capitale pour diverses raisons, touchant à la gestion des ressources en eau, à la sécurité des infrastructures, à l'environnement et à la planification économique.

Une gestion efficace des ressources en eau est essentielle pour assurer un approvisionnement en eau potable pour plus de six wilayas : Mila, Khenchela, Oum el bouaghi, Constantine, Batna et Jijel. Le volume d'eau influence également la santé des écosystèmes aquatiques et la biodiversité dans et autour du lac, préservant ainsi les habitats naturels et soutenant la diversité biologique. D'autre côté, les mesures précises du volume d'un lac de barrage sont nécessaires pour élaborer des modèles hydrologiques. Ces modèles prévoient les impacts des changements climatiques et des variations saisonnières sur les ressources en eau, permettant une planification à long terme et une gestion durable.

La mesure du volume du lac du barrage de Beni Haroun sera divisée en deux parties, la première étant le volume d'eau du lac par rapport au niveau normal de la retenue (NNR) pour

2000 (avant la mise en eau du barrage) et 2013 (barrage en exploitation), et la seconde étant le volume d'eau du lac par rapport au PHE (Plus Hautes Eaux) pour les deux périodes.

VI.2.3.1. Volume du lac par rapport au NNR :

➤ Avant la mise en eau du barrage (2000)

- **Surface du lac de Beni Haroun** : Dans cette partie, nous utiliserons la courbe de niveau, qui représente une hauteur de 200 mètres par rapport au niveau de la mer, correspondant au niveau normal de la retenue (NNR) dans le barrage de Beni Haroun. Nous remarquons que la forme du lac s'est formée, et que nous fermerons avec une ligne que nous considérerons comme le mur du barrage. À partir de ce point, nous pouvons maintenant calculer la surface et le périmètre du polygone. Où nous avons trouvés que la superficie est égale à 39,3 kilomètres carrés et un périmètre de 110.4055 km (Figure VI.8).

	FID	Shape *	surface	périmètr	surface_KM	perimeter
1	0	Polygon	39338500	110405	39,3385	110,405

Figure VI.10 : Surface et Périmètre du lac de Beni Haroun selon ArcGIS Pro.

- **Volume du lac de Beni Haroun** : Après avoir obtenu la superficie du lac de barrage, il faut passer au calcul du volume du lac, ce qui peut être réalisé de plusieurs façons soit par simulation en 3D, ce qui nécessite un ordinateur aux spécifications élevées pour traiter la taille du grand barrage, soit par la méthode simple qui consiste à diviser la superficie du barrage en points, dont chacun occupe une certaine superficie et porte la profondeur de cette superficie occupée.

Bien entendu, les résultats sont identiques, qu'ils soient obtenus par la première ou la seconde méthode, car le traitement de la forme tridimensionnelle doit passer par la seconde méthode de calcul pour montrer le volume d'eau dans le barrage, étant donné que la principale source d'information est le pixel du modèle numérique d'élévation, où il a été constaté que la surface du pixel obtenu dans cette étude est de 765.90 mètres carrés, répartis sur l'ensemble du polygone obtenu, telle qu'elle a été mesurée avec l'outil règle dans l'environnement de travail ArcGIS pro.

La formule de calcul du volume du lac consiste à multiplier la superficie susmentionnée par la profondeur de chaque point, et chaque point porte une information additionnelle, à savoir le volume. Finalement, on additionne les volumes et on trouve que le volume du lac de barrage de Beni Haroun avant la mise en eau (année 2000) est de **983 329 999,0 m³**.

Nous notons que le volume calculé selon l'étude du barrage est de 963 Hm³, et que nos résultats obtenus à l'aide du logiciel SIG sont de 983 Hm³, en raison d'imprécisions possibles :

- MNT à faible résolution ;
- Les données SIG peuvent utiliser des projections cartographiques et des systèmes de coordonnées différents, ce qui peut introduire des erreurs si elles ne sont pas correctement transformées ou ajustées ;
- Erreurs dans la collecte et le traitement des données ;
- Les données SIG peuvent ne pas être à jour, surtout si elles sont basées sur des sources plus anciennes.

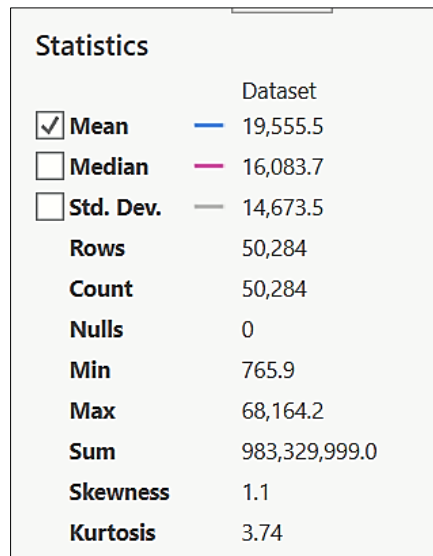


Figure VI.11 : Volume du lac de Beni Haroun avant la mise en eaux (2000) selon ArcGIS Pro (NNR).

Les colonnes statistiques montrent la distribution des volumes où le nombre de points a été divisé en 32 colonnes.

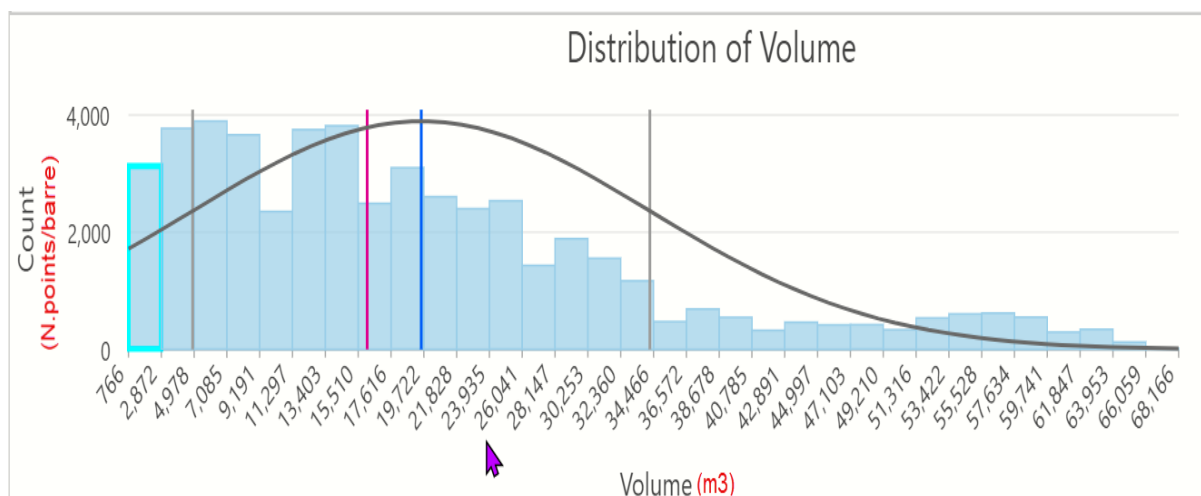


Figure VI.12 : Histogramme de la distribution des volumes de la retenue du barrage de Beni haroun (NNR).

➤ **Barrage après 10 ans d'exploitation (Mission Bathymétrique en 2013) :** Après la mission effectuée en 2013 par le laboratoire d'études maritimes (LEM), qui consistait à mesurer les profondeurs du lac de barrage de Beni Haroun, nous allons saisir les mesures obtenues pour l'ArcGIS pro. Cela ne différera pas beaucoup du processus de calcul du volume dans ce qui précède, sauf que l'interpolation des points obtenus doit être faite, on a choisi la méthode de krigeage également connue sous le nom de kriging, est une technique géostatistique largement utilisée pour l'interpolation et la prédiction spatiale de données. Elle est particulièrement réputée pour sa précision et sa capacité à fournir des estimations optimales sous certaines conditions.

- **Volume du lac en 2013 :** Après avoir suivi les étapes ci-dessus dans l'ArcGIS pro, nous obtenons le volume du lac pour 2013, qui est égal à **875 546 163,0 m³**. La Figure VI.11 montre les données statistiques des volumes collectés.

Statistics	
	Dataset
☒ Mean	52,497.1
☐ Median	43,428.1
☐ Std. Dev.	40,219.9
Rows	16,678
Count	16,678
Nulls	0
Min	8.6
Max	152,467
Sum	875,546,163.0
Skewness	0.9
Kurtosis	3.07

Figure VI.13 : Volume du lac de Beni Haroun en 2013 selon ArcGIS Pro (NNR).

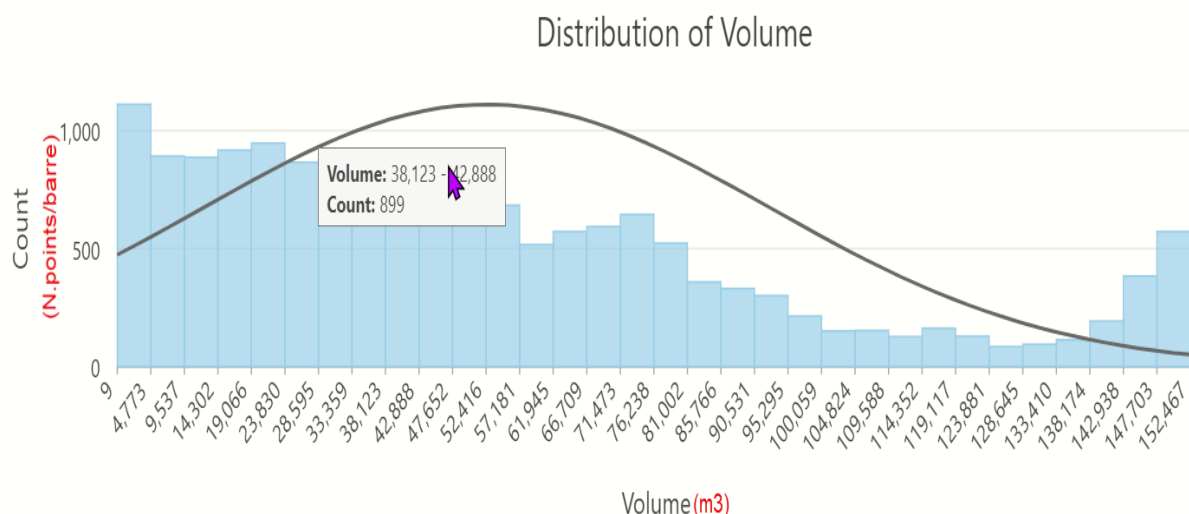


Figure VI.14 : Histogramme de la distribution des volumes de la retenue du barrage de Beni haroun en 2013 (NNR).

VI.2.3.2. Volume du lac par rapport au niveau des plus hautes eaux (NPHE) :

➤ Avant la mise en eaux (2000)

- **Surface du lac de Beni Haroun** : Dans cette partie, nous utiliserons la courbe de niveau, qui représente une hauteur de 214.8 mètres par rapport au niveau de la mer, correspondant au niveau la plus haute eau (NPHE) dans le barrage de Beni Haroun. On utilise les mêmes étapes pour calculer le volume correspondant au NNR, on trouve une superficie égale à **54.3266 km²** et un périmètre de **145.365 km** (Figure VI.13).



Figure VI.15 : Forme du lac à la courbe de niveau 214.8 m (NPHE).

- **Volume du lac** : Après avoir calculé la superficie du lac à NPHE (214,8 m), il n'y aura pas d'obstacle à l'extraction du volume d'eau pour cette hauteur dans l'ArcGIS, on suivra les étapes précédentes, le lac de barrage à cette hauteur peut contenir un volume d'eau de **1.668.852.114,6 m³**.

Statistics	
	Dataset
☒ Mean	24,182.1
☒ Median	22,087.1
☒ Std. Dev.	16,802.2
Rows	69,012
Count	69,012
Nulls	0
Min	613.5
Max	79,605.6
Sum	1,668,852,114.6
Skewness	0.88
Kurtosis	3.46

Figure VI.16 : Volume du lac de Beni Haroun avant la mise en eau NPHE (2000).

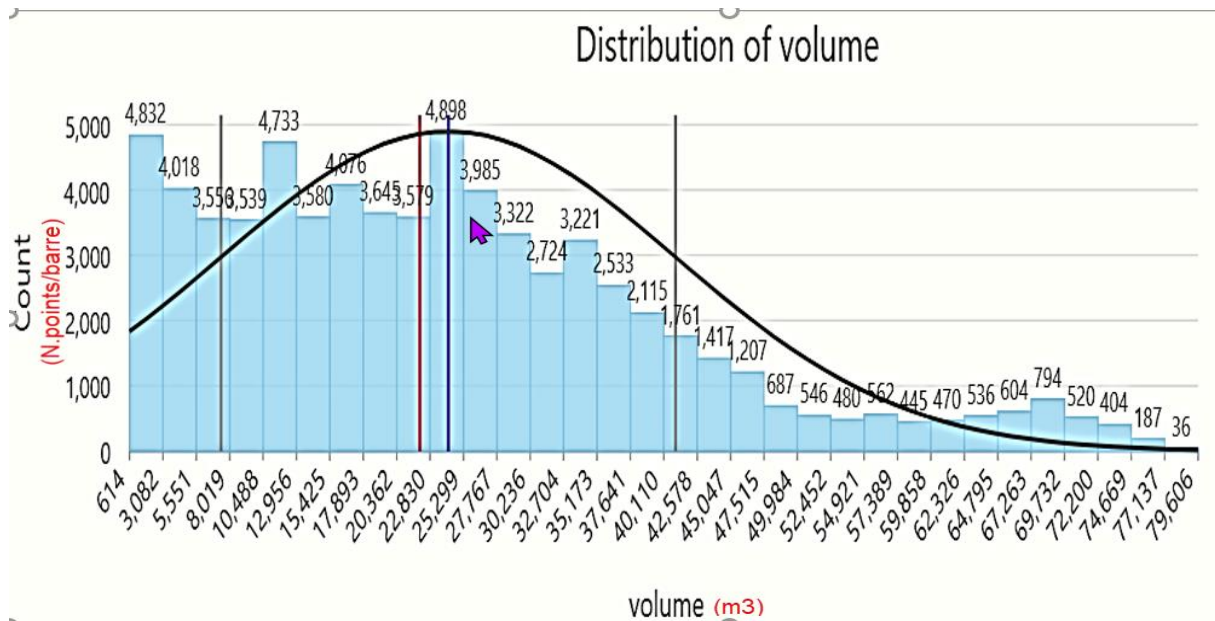


Figure VI.17 : Histogramme de la distribution des volumes avant la mise en eau en 2000 (NPHE).

- **Barrage à 10 ans d'exploitation (Mission Bathymétrique en 2013) :** Après avoir calculé le volume d'eau que peut contenir le lac du barrage de Beni Haroun, nous avons trouvé qu'il est estimé à **1 566 988 729,4 m³**, ce qui est très proche de la valeur calculée par le LEM, estimée à 1551 Hm³. La seule différence est que nous avons utilisé la méthode d'interpolation de kriging et que l'étude menée par le laboratoire a utilisé la méthode de triangulation (Figure VI.16).

Statistics	
Dataset	
☒ Mean	65,397.5
☒ Median	57,275.7
☒ Std. Dev.	46,208.2
Rows	23,961
Count	23,961
Nulls	0
Min	187.5
Max	186,133.2
Sum	1,566,988,729.4
Skewness	0.81
Kurtosis	3.06

Figure VI.18 : Volume du lac de Beni Haroun en 2013 (NPHE).

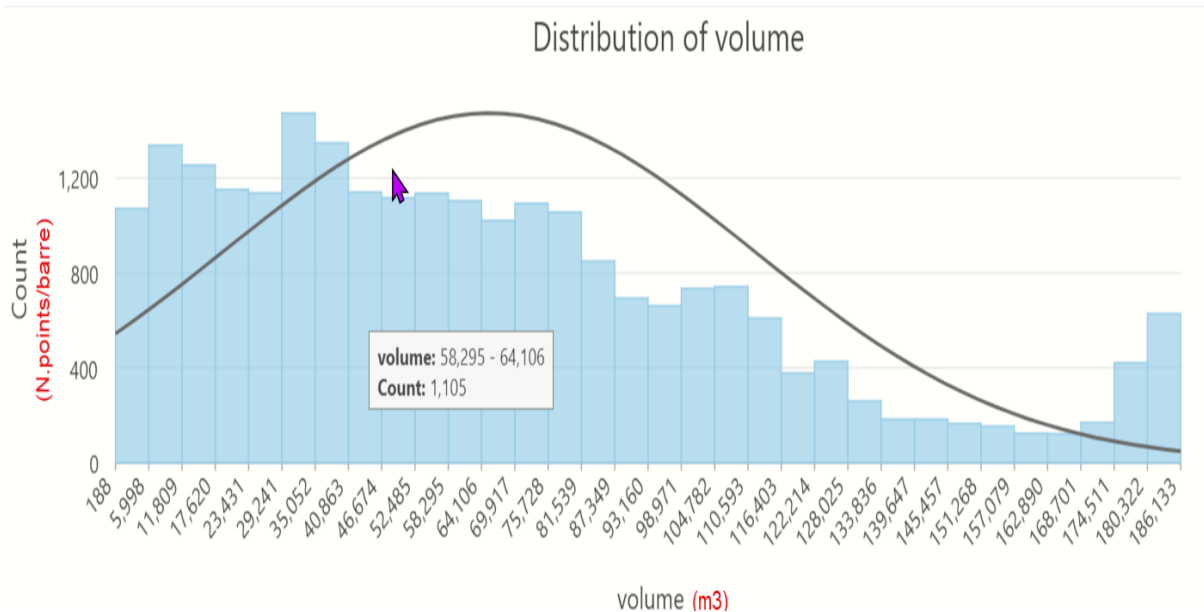


Figure VI.19 : Histogramme de la distribution des volumes après 10 ans d'exploitation en NPHE (2013).

Discussion :

- Les résultats obtenus à partir du logiciel ArcGIS Pro ont montré que le lac de barrage de Beni Haroun, d'une superficie totale de **39,3385 km²** au niveau normal de la retenue (NNR=200 m), et d'un périmètre de **110,405 km** (Fig. VI.8), peut contenir un volume d'eau de **983,33 Hm³** (Fig. VI.9), à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) pris le 11/02/2000.
- Après 10 ans d'exploitation, une étude menée par le laboratoire d'études marines (LEM) montre que la capacité du barrage a diminué de 10,96 % en 10 ans, soit un taux annuel de 1.09 %. Cette diminution du réservoir du barrage s'explique par la quantité de sédiments et de vase apportés par le cours d'eau, est qui décanté au fond de la retenue.
- Le tableau des données statistiques montre que dans tous les cas considérés, le coefficient d'aplatissement est supérieur à 3, ce qui signifie que la distribution présente des queues lourdes et des pics marqués par rapport à la distribution normale. Dans tous les tableaux, nous pouvons voir que les distributions laplaciennes présentent un regroupement des données autour de la moyenne et la présence de valeurs aberrantes plus fréquentes (c'est-à-dire des queues plus lourdes). Il est important de comprendre la raison de ce kurtosis élevé, car après observation, il s'est avéré que la raison de cette distribution de l'eau dans le lac est due à la nature environnementale intégrée dans la nature constitutive du terrain du bassin du réservoir.

VI.2.4. Cartes Topographiques :

La cartographie topographique du barrage de Beni Haroun peut avoir de nombreux avantages et utilisations importants. Ces cartes fournissent des détails précis sur la topographie et la géographie de la zone autour du barrage, contribuant à un large éventail d'activités et de décisions en matière de gestion et d'ingénierie. Elles aident à analyser les eaux de surface en identifiant les voies d'eau et la manière dont elles s'écoulent dans le barrage, ce

qui permet de gérer les ressources en eau plus efficacement, et de déterminer le volume d'eau que le barrage peut contenir en fonction des différents terrains et élévations.

Deux cartes topographiques ont été créées à l'aide du logiciel ArcGIS Pro correspondant au NNR, la première basée sur un modèle numérique de terrain datant du 11/02/2000, soit la période avant la mise en eaux du barrage, et la seconde pour décembre 2013, soit 10 ans d'exploitation basée sur une mission bathymétrique du LEM.

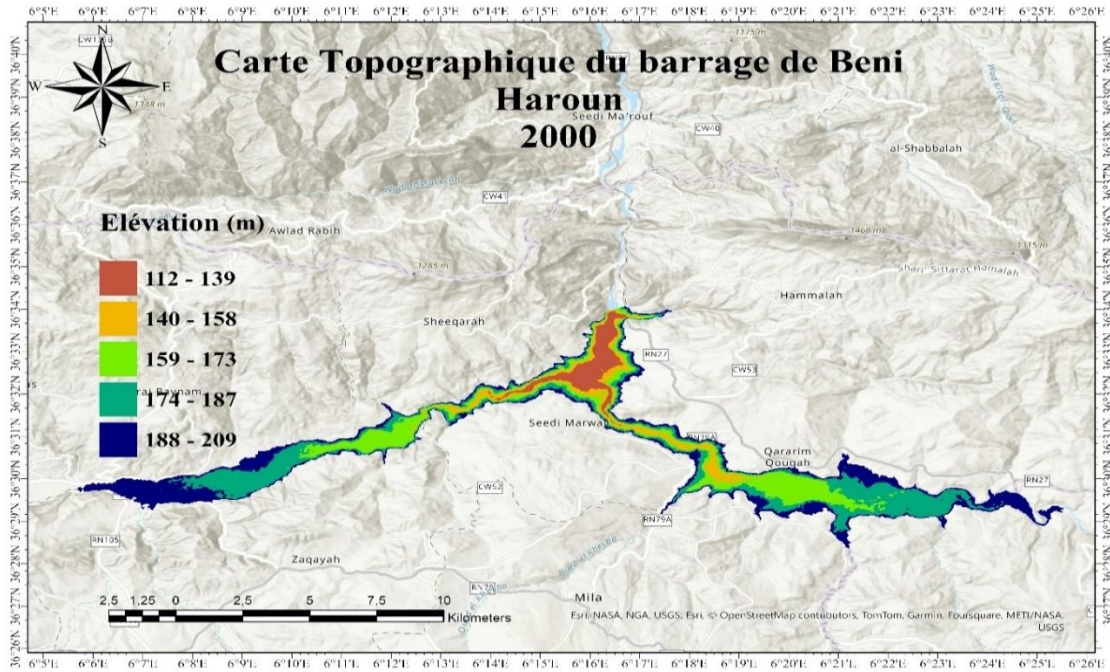


Figure VI.20 : Carte topographique du barrage de Beni Haroun avant la mise en eau (2000).

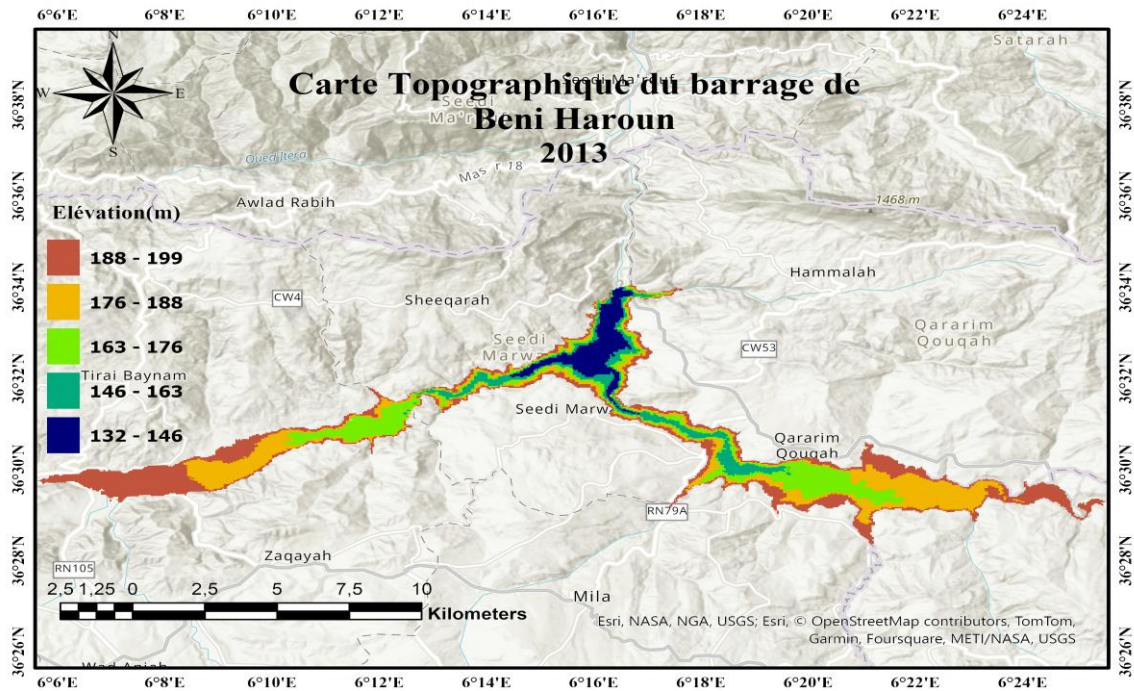


Figure VI.21 : Carte topographique du barrage de Beni Haroun en 2013 (10 ans d'exploitation).

Interprétation des cartes :

- La première carte (Fig. VI.18) représente les élévations par rapport au niveau de la mer pour l'année 2000, où le niveau le plus bas est de 112 m et le niveau le plus haut est de 209 m selon le contour qui a été déterminé, les élévations ont été divisées en cinq niveaux, chaque niveau est représenté dans une couleur différente, qui sépare deux courbes de niveau.
- La deuxième carte (Fig.VI.19) représente les élévations par rapport au niveau de la mer pour l'année 2013, où le plus bas niveau est de 132 m et le niveau le plus haut est de 199 m selon le contour qui a été déterminé, les élévations ont été divisées en cinq niveaux, chaque niveau est représenté dans une couleur différente, qui sépare deux courbes de niveau.
- Ce qui a été observé ici, c'est qu'après 10 ans d'exploitation, la hauteur la plus basse du lac du barrage de Beni Haroun est de 132 mètres, ce qui confirme qu'une grande quantité de limon et de sédiments s'est accumulée et a réduit le volume de stockage de l'eau. Si nous comparons le premier niveau d'élévation, qui est situé près du mur du barrage, il a augmenté de 20 mètres entre 2003 (date de la première mise en eaux du barrage) et 2013 à un taux de 2 m par an sur une zone d'environ 8 kilomètres carrés représentée en couleur mauve selon la clé de la carte.

VI.2.4.1 Calcul du volume d'envasements :

Après avoir calculé le volume d'eau dans le lac du barrage de Beni Haroun avant sa mise en eau, qui a été extraite du modèle numérique de terrain (MNT) et le volume calculé à partir des mesures bathymétriques (2013), il est maintenant facile de calculer le volume de sédiments et de vase accumulé durant cette période. L'équation suivante permet de calculer le volume de vase : $V_v = V_{2000} - V_{2013}$

$$V_v = 983\,329\,999 - 875\,546\,163$$

$$V_v = 107\,783\,836 \text{ m}^3 \text{ de laves pendant 10 ans d'exploitation.}$$

Où : V_v : Volume de la vase en m^3 .

V_{2000} : Volume d'eaux du lac du barrage de Beni Haroun avant la mise en eau (2000) correspond à NNR en m^3 .

V_{2013} : Volume d'eaux du lac du barrage de Beni Haroun en 2013 en m^3 .

Nous pouvons donner une valeur annuelle pour la quantité de limon, qui ne sera pas une valeur exacte en raison de l'indisponibilité des données et des mesures chaque année, mais qui sera approximative en divisant le volume de la vase par le nombre d'années, soit **107.78 Hm^3/an** .

VI.2.5. Courbes capacité-niveau-surface

La courbe capacité-hauteur-surface (parfois appelée courbe de stockage ou de remplissage) est un graphique important utilisé principalement dans l'étude des réservoirs. Elle représente

la relation entre la hauteur d'eau dans un réservoir, la surface de l'eau à cette hauteur, et le volume d'eau stocké dans le réservoir.

Les courbes capacité-niveau-surface (Fig. VI.20, VI.21), sont calculées à partir des levés topographiques de la retenue du barrage de Beni Haroun avant la mise en eaux (ANBT, 2002) et des mesures topo-bathymétrique (2013) faite par le Laboratoire d'Etudes Maritimes (LEM) (2013). (ANBT, 2013)

La courbe (Fig. VI.20) montre que le volume d'eau total est de 963 hm^3 correspond à un niveau NNR=200 m, couvre une surface inondable de **39.29 km^2** ; Le volume débute de cumuler à partir du niveau 120 jusqu'au NNR. La pente raide de la courbe indique que la capacité augmente rapidement avec la hauteur, ce qui signifie généralement que le réservoir est plus profond près de la digue. Dans la figure VI.21, on observe que le NNR correspond à un volume de **880.14 Hm^3** , couvre une superficie inondable de **38.46 km^2** et que le remplissage débute du niveau 132 m jusqu'au NNR.

La différence de volume d'eau dans le réservoir du barrage de Beni Haroun entre 2003 et 2013 est égale à **82.86 hm^3** , qui correspond au volume des sédiments cumulés au fond de la retenue, qui se cumule d'une hauteur de 12 m près de la digue (Fig. VI.22).

L'apport solide estimé dans le cadre de l'étude d'avant-projet du barrage est de $6 \text{ hm}^3/\text{an}$, soit 60 hm^3 par 10 ans, dans la réalité on remarque que durant cette décennie il est supérieur de cette estimation d'une valeur de 22.86 hm^3 . On remarque que l'envasement est accéléré par 14 % par rapport l'étude de l'avant-projet.

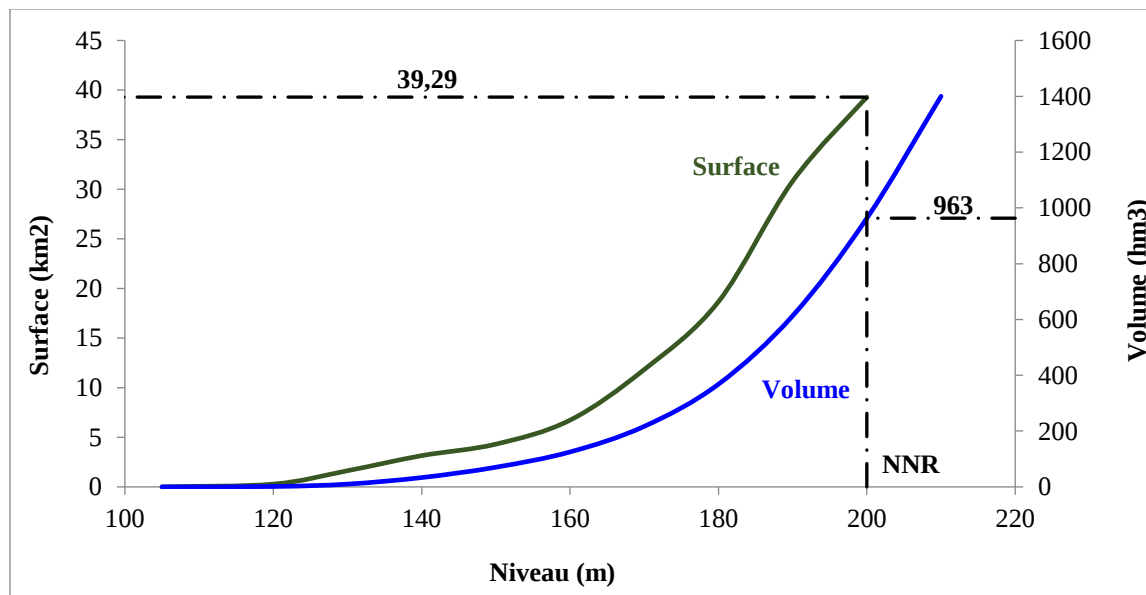


Figure VI. 22: Courbe capacité-niveau-surface avant la mise en eaux (2002)

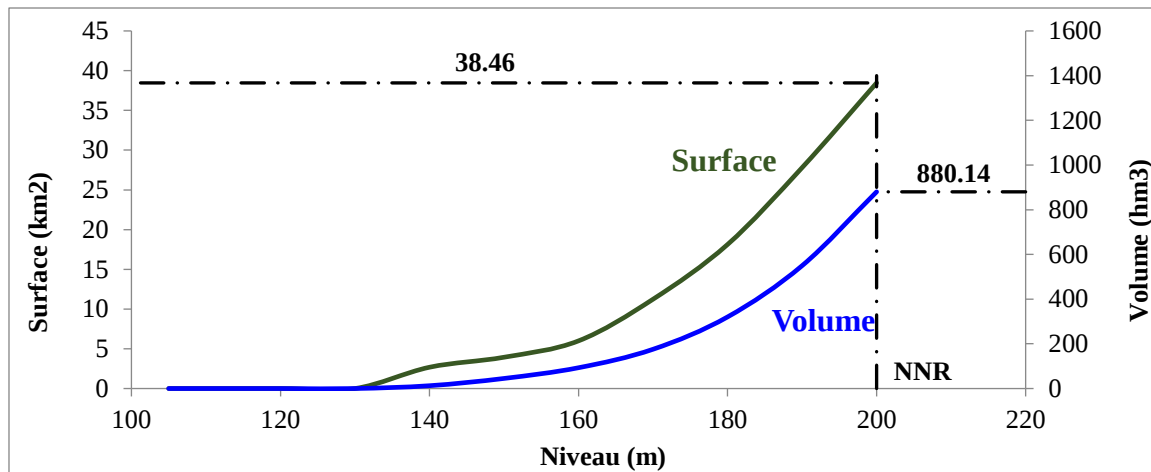


Figure VI. 23: Courbe capacité-niveau-surface après 10 ans d'exploitation (2013)

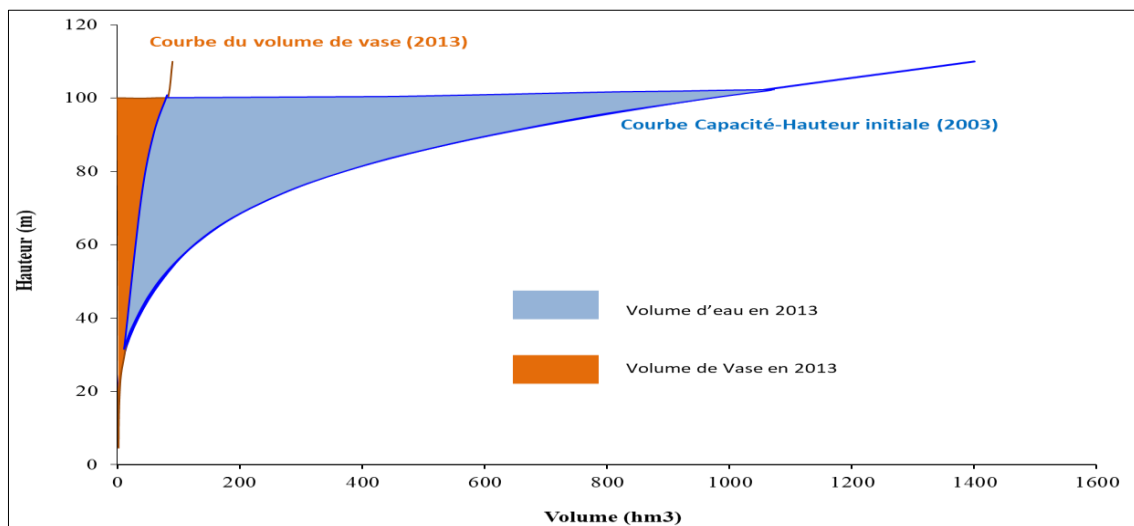


Figure VI.24 : Evolution des volumes d'eau et de vase en fonction de la hauteur.

VI.2.5. Cartes bathymétriques :

Les cartes bathymétriques sont des représentations graphiques de la topographie sous-marine ou sous-aquatique d'un plan d'eau. Dans le contexte du Barrage de Beni Haroun, une carte bathymétrique fournirait une vue détaillée de la topographie du fond du réservoir sachant que le calcul avec précision du volume d'eau que peut contenir le barrage. Aussi aident à surveiller et à gérer la sédimentation.

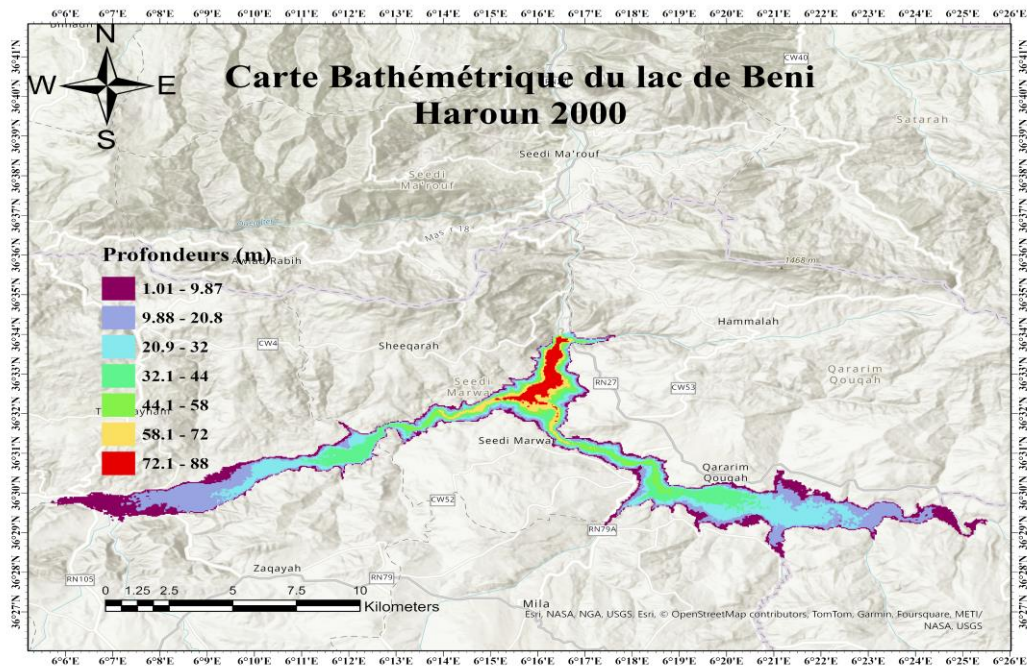


Figure VI.25 : Carte bathymétrique du lac du Barrage de Beni Haroun avant la mise en eau (2000).

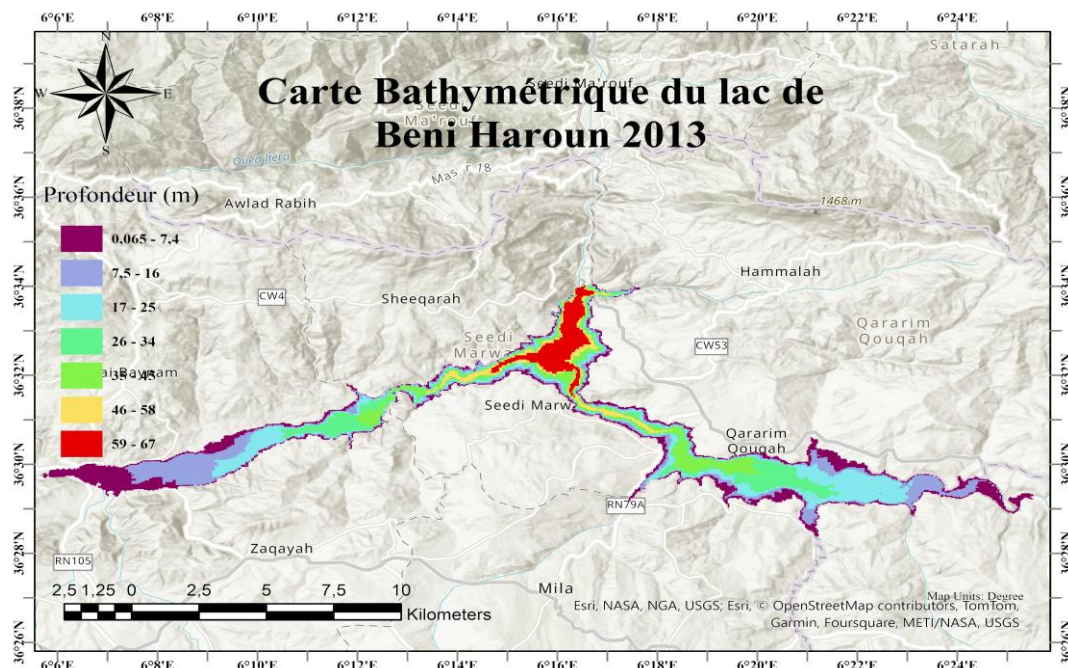


Figure VI.26 : Carte Bathymétrique du lac du Barrage de Beni Haroun après 10 ans d'exploitation (2013).

Discussion :

- La première carte bathymétrique de 2000 est théorique, car à l'époque la construction du barrage n'était pas achevée, mais elle reflète les profondeurs du bassin lacustre du barrage de Beni Haroun.
- Les profondeurs étaient divisées en 7 sections réparties sur l'ensemble du bassin, avec une profondeur maximale de 88 mètres, alors que la profondeur maximale de la

deuxième carte de 2013 était de 67 mètres, soit une diminution de 21 mètres en 10 ans.

- Cette diminution a affecté la capacité de stockage de l'eau, ce qui est considéré comme étant dû à la quantité de sédiments et de limon qui ont été collectés pendant cette période et pour lesquels le mur du barrage a formé une barrière.
- Les deux cartes montrent que les grandes profondeurs sont réparties à proximité du mur du barrage.
-

Conclusion

Dans ce chapitre, on a tenté d'évaluer le volume du lac du barrage de Beni Haroun pour les années 2000 (avant la mise en eau) et 2013 (après 10 ans d'exploitation) en utilisant deux méthodes distinctes. Pour l'année 2000, un modèle numérique de terrain (MNT) a été utilisé, tandis que pour l'année 2013, des données de mission bathymétrique ont été employées. L'analyse a révélé non seulement les changements de volume du lac, mais aussi la quantité de sédiments accumulés durant cette période.

Les résultats montrent une dynamique significative du volume du lac entre sa mise en eau (2003) et 2013. Les cartes topographiques et bathymétriques générées ont permis une visualisation détaillée des variations de la morphologie du bassin. En quantifiant les dépôts de sédiments annuels, nous avons pu estimer la réduction du volume du lac due à la sédimentation. Cette information est très importante pour la gestion durable des ressources en eau et pour anticiper les besoins de dragage afin de maintenir la capacité du réservoir.

L'approche méthodologique adoptée, combinant des techniques de télédétection et de mesures directes, illustre l'importance de l'intégration de différentes sources de données pour une analyse environnementale complète. Les résultats obtenus peuvent servir de base pour des études futures et pour la mise en œuvre de stratégies de gestion efficaces du barrage de Beni Haroun. En outre, cette modeste étude souligne la nécessité de poursuivre les observations et les mesures régulières pour mieux comprendre les processus de sédimentation et leur impact sur les infrastructures hydrauliques.

En fin, ce chapitre non seulement fourni une évaluation des volumes du lac pour les années étudiées, mais a également mis en lumière les défis posés par la sédimentation. Les cartes produites et les données obtenues sont des outils précieux pour les décideurs et les gestionnaires des ressources en eau. Cette étude contribue ainsi de manière significative à la gestion durable des barrages et à la protection des ressources hydriques dans la région.

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'envasement des barrages est un problème majeur, affectant la performance et la durabilité des infrastructures hydrauliques, réduire la capacité de stockage, dégrade la qualité des eaux, augmente les coûts de maintenance...etc.

L'utilisation des technologies modernes pour estimer l'envasement dans les barrages a révolutionné la manière dont les gestionnaires d'infrastructures hydrauliques abordent ce problème. Les drones bathymétriques sont des outils indispensables pour la gestion moderne des barrages. Leur capacité à fournir des données précises et en temps réel transforme la manière dont les ingénieurs et les gestionnaires de barrages abordent le problème de l'envasement. En intégrant ces technologies dans les stratégies de gestion des barrages, il est possible d'améliorer la durabilité et l'efficacité des infrastructures hydrauliques tout en minimisant les impacts environnementaux.

Notre étude souligne aussi l'importance de l'utilisation de technologies avancées telles que l'imagerie aérienne à haute résolution et l'analyse géographique pour estimer et surveiller avec précision le niveau d'envasement des barrages, ce qui contribue à améliorer la gestion des ressources en eau et à atténuer les effets de la sédimentation sur le milieu environnant. En outre, l'étude démontre l'importance de la collaboration avec les laboratoires de recherche marine et de l'adoption de technologies modernes pour maintenir la durabilité des barrages et améliorer leur capacité à répondre aux besoins de la société avec de l'eau propre et durable. Ainsi notre étude souligne également le rôle des logiciels SIG tels qu'ArcGIS et QGIS dans la facilitation des analyses géographiques, l'amélioration de la gestion des barrages et dans l'identification des mesures à prendre pour relever les défis de la sédimentation.

Dans cette étude, on a contribué à déterminer la quantité de la vase accumulée dans le barrage de Beni Haroun. Le barrage reçoit environ 8,3 millions de mètres cubes de vase par an, l'apport solide estimé dans le cadre de l'étude d'avant-projet du barrage est de 6 hm³/an, soit 60 hm³ par 10 ans, dans la réalité on remarque que durant cette décennie il est supérieur de cette estimation d'une valeur de 22.86 hm³. On remarque que l'envasement est accéléré par 14 % par rapport l'étude de l'avant-projet.

En fin, le mémoire souligne l'importance de la recherche continue et de l'innovation dans les techniques de gestion des ressources en eau, ainsi que la nécessité de promouvoir la durabilité environnementale de l'infrastructure hydrologique. Les efforts conjoints entre la recherche scientifique et les applications techniques devraient être la pierre angulaire du développement de stratégies efficaces pour préserver les ressources en eau et l'environnement, afin de garantir que les besoins de tous soient satisfaits de manière durable et équitable à l'avenir.

Références bibliographiques

Références

- ANBT (2002) : Barrage de Beni Haroun sur L'oued Kebir. Monographie volume 1 Textes. Tractebel Engineering.
- ANBT (2013): Levés bathymétriques de onze (11) barrages en exploitation annexe n° 9 tableau hauteur / capacité / surface. Laboratoire d'Etudes Maritimes (LEM) Djenane El Malik- Hydra-Alger
- Aoufa, M., Baghdad, B., El Hadi, H (2022) Quantification and Evaluation of Water Erosion by RUSLE/GIS Approach in the Ykem Watershed (Western Morocco). *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2022; 23(5):42-53. doi:10.12912/27197050/151631.
- Asadi A (2016). Drones: the complete manual: the essential handbook for drone enthusiasts. Dorset: Imagine Publishing.
- Baade, J., Zoller, K., van Zyl, W., and Cawthra, H.(2022) Reservoir siltation mapping uncertainties – experiences from South Africa, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-9930, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-9930>, 2022.
- Belaout F. (2022). Valorisation des sédiments d'envasement du barrage Djorf-Torba (wilaya de Bechar). Thèse doctorat LMD. Université Ahmed Draria – Adrar
- Bird H. (2019) F450 dimensions · Large Quadcopter Build. Retrieved from george-hawkins.github.io website: <https://george-hawkins.github.io/arf-drone/docs/f450-dimensions>
- Boulaiche M. ; Arous A., (2015). influence des eaux du barrage de béni haroun sur l'hydro-système hivernaux, mem. master, université de constantine.
- Benaicha A. (2011). Etude des processus des transports solide et leur impact sur l'alluvionnement des barrages. Thèse de magister. Université de Batna.
- Bisquay H. (2010). Cours de la bathymetrie. ed GENAVIR. Support de cours
- Boubakeur M ., Lakhal R. (2021). Problèmes de risque d'envasement des barrages (cas du barrage Ain Dalia Souk Ahras). Mémoire de master. Université de Souk ahras.
- BouKheir R, Shaban A, Khawlie M, Girard MC. (2001). Impact des activités humaines sur l'érosion hydrique des sols dans la région côtière montagneuse du Liban. *Science et changements planétaires / Sécheresse*. 2001;12(3):157-66.
- Brak S.(1986). Méthodes de calcul de la sédimentation dans les lacs et les réservoirs Contribution au Programme Hydrologique Internationale PHI - II Project A.2.6.1 Panel
- Cache, T., Ramirez, J. A., Molnar, P., Ruiz-Villanueva, V., and Peleg, N.(2023) Climate change impacts on precipitation and future erosion rates in a pre-Alpine region, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-1124, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1124>, 2023.
- Chebbah L ; Kabour A (2023) Characterization of leakage water flows in the subsoil of Beni Haroun dam by hydrogeological approach. *ACTA HYDROLOGICA SLOVACA* , 24(1), 14 – 23, Institute of Hydrology of the Slovak Academy of Sciences
- Chebbah L., Kabour A. Détermination de la formule appropriée pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans une région aride : Application à la station de Béchar (SW Algérien). *Science et Nature*, 2024.
- Chouret, A. (1977). La mesure du débit solide des cours d'eau .Etude de transport solide - Mise en oeuvre des méthodes Synthèse des résultats obtenus en République du Tchad. Notes techniques du centre ORSTOM de N/Djamena. N16.

- Dlnya A, Sameer A, Alani, S., Sarmad N M (2020). Design and Implementation of GPS Based Quadcopter Control System. <http://dx.doi.org/10.4108/eai.28-6-2020.2297931>
- Faiyaz A, M. Nayab Z, Jagadish Chandra M (2020) Modeling and Analysis of Quadcopter F450 Frame. Conference: 2020 International Conference on Contemporary Computing and Applications (IC3A). DOI: 10.1109/IC3A48958.2020.233296
- Febles Díaz, J.M., Rodríguez Soto, C., Baró Suárez, J.E. (2022). A method for the economic estimation of dam siltation: a case study in Mexico. *Model. Earth Syst. Environ.* 8, 2837–2852 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01264-8>
- Gargarella R. (2022) “Democratic Erosion.” In: *The Law As a Conversation among Equals. Cambridge Studies in Constitutional Law*. Cambridge University Press; 2022:270-289.
- Gonzalez Rodriguez, L., McCallum, A., Kent, D. (2023) A review of sedimentation rates in freshwater reservoirs: recent changes and causative factors. *Aquat Sci* 85, 60 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00027-023-00960-0>
- Guenther, G., (2000). Meeting the accuracy challenge in airborne LiDAR bathymetry. *Proceedings of the 20th EARSeL-SIG-Workshop LIDAR*. 16-17 Juin 2000, 1, p. 27.
- Harza Engineering Company. (1984). "Etude technico-économique conduisant au choix du site". November, Vol. 3, Annexe B- Géologie.
- Hurtòs Vilarnau, N. (2009). Integration of optical and acoustic sensor data for 3D underwater scene reconstruction. Architecture and Technology University. Girona, 2009. Thèse de Master en Vision et Robotiques (Programme VIBOT).
- Huard P.S, Barnier N, Brisset P, Verfaillie G (2009) Planification de mission pour une patrouille de micro-drones. JFPDA 2009, 4èmes Journées Francophones de Planification, Décision et Apprentissage pour la conduite de systèmes, Jun 2009, Paris, France. pp xxxx. fhal-00938195f
- Ibrahim. P, O., , Sternberg H., Hassan, A., Samaila-Ija., D., Adgidzi., I, Jonathan, N. (2022). Modelling topo-bathymetric surface using a triangulation irregular network (TIN) of Tunga Dam in Nigeria. *Applied Geomatics*, doi: 10.1007/s12518-022-00438-y
- Jalu Ahmad Prakosa, Samokhvalov, Vidangos, & Fuad Sh. Al-Mahturi, (2019). Speed Control of Brushless DC Motor for Quad Copter Drone Ground Test. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656647
- Kabili S , Algouti A, Algouti A , El Ghouat A. (2023). Quantification of water erosion using empirical models RUSLE and EPM in the Rheraya basin in the High Atlas of Marrakech. *Disaster Advances*. Vol. 16 (5) May (2023)
- Kilby, T., et Kilby, B. (2015). *Getting Started with Drones*. Maker Media, Inc. p54
- Llort-Pujol, G. (2012). Advanced interferometric techniques for high resolution bathymetry. *Journal of Marine Technology society*. 8 octobre 2012, Journal 46.
- Lakache H et Mebarki A (2015) Comportement hydrologique des oueds Rhumel-Endja et variabilité des apports au barrage Beni Haroun (Algerie orientale). IV^{ème} colloque international : « eau et climat : regard croises Nord-Sud » Constantine, 24 -25 Novembre 2015
- Lurton X. (1998). Acoustique sous-marine. Présentation et aoolication. IFERMER. 1998. P114. ISBN 2-90534-929.

- Malavoi, J.R ; Garnier, C.C ; Landon, N ; Recking, A ; Baran, Ph. (2010). *Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*. Edition ONEMA.
- Mandlbürger, G. (2011). Airborne Hydrographic LiDAR Mapping - Potential of a new technique for capturing shallow water bodies. International Congress on Modelling and Simulation. 19th, 2011.
- Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M. et Pfeifer, N. (2013). Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry - A case study at the river Pielach. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 11-13 Novembre 2013, Vol. II, 5.
- Mcgriffy, D. (2017). *Make: drones : teach an arduino to fly*. San Francisco, Ca: Maker Media
- Mekash, Shiferaw., Roman, Abebe. (2021). Reservoir sedimentation and estimating dam storage capacity using bathymetry survey: a case study of Abrajit Dam, Upper Blue Nile basin, Ethiopia. Applied Geomatics, doi: 10.1007/S12518-020-00348-X
- Migniot C. (1989). Tassement et rhéologie des vases Première partie. La houille blanche/n° 1-1989 <https://doi.org/10.1051/lhb/1989001>
- Mobley, C. (1994). *Light and water: radiative transfer in natural waters*. Academic Press, 1994. p. 592. ISBN 0125027508.
- Myriam L, Luc F, N'Tjie C, Didier M, Nadine M. (2012) Evaluation et analyse de la dynamique sédimentaire dans le barrage-réservoir de Sélingué (Mali). *Revue de Géographie de Ouagadougou*, 2012, pp.45-68. [ffhalshs-00940466f](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00940-4_66)
- Nikolaos, EE., Lykoudi., Emmanouil, P. (2020). Inherent relationship of the USLE, RUSLE topographic factor algorithms and its impact on soil erosion modelling. *Hydrological Sciences Journal-journal Des Sciences Hydrologiques*, doi: 10.1080/02626667.2020.1784423
- Ning, Z., Wlezien, R. W., Hu, H. (2017) An Experimental Study on Small UAV Propellers with Serrated Trailing Edges. <https://doi.org/10.2514/6.2017-3813>
- Nouvelot, J.F. (1992). *Erosion mécanique, transport solide, sédimentation dans le cycle de l'eau*. Institut Français de la Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM), Centre de Montpellier.
- Nuttall, B. (2021). What is a Raspberry Pi? Retrieved June 6, 2024, from Opensource.com website: <https://opensource.com/resources/raspberry-pi>
- Ouvry JF. (2012) « Dégradation des sols par l'érosion hydrique : quels remèdes en région de grandes cultures », *Pour*, 2012/1 (N° 213), p. 163-176. DOI : 10.3917/pour.213.0163. URL : <https://www.cairn.info/revue-pour-2012-1-page-163.htm>
- Peters, J.J. (2009). *Cours Hydrographie - Transports solides : Mesure du mouvement des sédiments, des érosions et dépôts, des affouillements*.
- Radjah S. (2017). *Modélisation du Transport solide par le modèle S.W.A.T (Application sur le Bassin versant des Issers)*. Mémoire d'ingénieur. ENP. Algérie
- Rajendran, S., Nasir, S. & Jabri, K.A. (2020) Mapping and accuracy assessment of siltation of recharge dams using remote sensing technique. *Sci Rep* 10, 10364 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67137-9>
- Recking, A. (2017). *Eléments de géomorphologie fluviale Cahier 3 : La mesure du charriage en rivière*.
- Remini B. (2019). L'Algérie : de la boue au fond des barrages, que faire ? *Algeria: the mud at the bottom of the dams, what to do?*. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°40, Dec 2019, pp. 213-247

- Remini B. (2016). Siltation of dams in arid regions algerian examples. LARHYSS Journal. Iss: 27, pp 63-90
- Rickson J. (2023). Water induced soil erosion, Encyclopedia of Soils in the Environment (Second Edition), Academic Press, Pages 193-207
- Roose E.J. Lelong et F.. (1976). Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale. Études sur petites parcelles expérimentales de sol. Revue de géographie physique et de écologie dynamique (21, VOL. XVIII, FASC. 4, pp. 365-374, PARIS, 1976.
- Sabir M. (1986). L'érosion hydrique et sa quantification. Mémoire DEA. Université de paris XI.
- Samuel C N; Munyaradzi M; Manny M. (2019) . Farm dam siltation and sediment source tracing in the Zeerust Swartruggens area in the north-west of South Africa International Journal of Hydrology Science and Technology (IJHST), Vol. 9, No. 3, 2019
- Satla Z, Bendine K (2023) Conception Assistée Par Ordinateur (CAO). Polycopié de cours. Université de Tissemsilt
- Slattery, B.R. (1966). Use of Mills' cross receiving arrays in radar system. 11. I.E.E., 1966.p. 1712. Vol. 113.
- Smith M (2015) Quadcopters and drones “ A beginner's guide to successfully flying and choosing the right drone”
- Teffaha S et Lakhal K (2016) Contribution à l'étude des impacts du barrage de Béni Haroun sur le plan climatique et hydrologique de la region de Mila. Mémoire master. CUAB Mila.
- Tiwari. J., Thornton. CM., Yu Bofu., (2021). The Brigalow Catchment Study: VI. Evaluation of the RUSLE and MUSLE models to assess the impact of clearing brigalow (*Acacia harpophylla*) on sediment yield. Soil Research, doi: 10.1071/SR21030
- Uber, M.; Rössler, O.; Astor, B.; Hoffmann, T.; Van Oost, K.; Hillebrand, G. (2022) Climate Change Impacts on Soil Erosion and Sediment Delivery to German Federal Waterways: A Case Study of the Elbe Basin. Atmosphere 2022, 13, 1752. <https://doi.org/10.3390/atmos13111752>

Sites Web

- <https://fac.umc.edu.dz/fst/fichiers/moon/7eme%20Cours%20erosion%20hydrique%20et%20eolienne.pdf>
- <https://www.grandcalais.fr/semaine-eau-erosion-ruissellement/>
- <https://www.ontario.ca/fr/page/lerosion-du-sol-causes-et-effets#section-3>
- <https://www.ontario.ca/fr/page/lerosion-du-sol-causes-et-effets>
- <https://www.supagro.fr/ress-pepites/Opale/ProcessusEcologiques/co/Erosion.html>
- <https://fac.umc.edu.dz/fst/fichiers/moon/7eme%20Cours%20erosion%20hydrique%20et%20eolienne.pdf>
- <https://www.eaufrance.fr/les-impacts-de-lerosion#:~:text=Outre%20la%20d%C3%A9gradation%20de%20la,parfois%20m%C3%A9me%20C3%A0%20court%20terme.>
- <https://openknowledge.fao.org/home>
- <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/289/1/ETUDE-ET-VALORISATION-DES-SEDIMENTS-DE-DRAGAGE-DU-BARRAGE-BAKHADDA-TIARET.pdf>

https://m.facebook.com/anbt.communication/photos/a.576689372701326/746007272436201/?type=3&locale=hr_HR
<https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/4170/bathymetrie>
https://fr.wikipedia.org/wiki/Sondage_%C3%A0_main
<https://journals.openedition.org/vertigo/10947>
<https://www.dynalit.fr/Mesures/Instruments-de-mesure/Morphologie/Sondeur-acoustique>
<https://www.cadden.fr/bathymetrie-cartographie-fonds-marins/>
https://diffusion.shom.fr/expertises-formation/qualification_des_lev%C3%A9s_bathym%C3%A9triques.html
https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/png/PNG%202011/2010_b062.pdf
https://www.bfmtv.com/international/europe/angleterre/londres-un-pilote-pense-avoir-heurte-un-drone-a-l-aeroport-d-heathrow_AN-201604180127.html
<https://www.dronexperts.com/article/photogrammetrie-par-drone/>
<https://ns-communication.fr/blog/mission-drone/les-avantages-de-la-photogrammetrie-par-rapport-aux-methodes-traditionnelles>
<https://www.yellowscan.com/fr/press-news/introducing-the-yellowscan-navigator-bathymetric-lidar-system/>
https://iho.int/uploads/user/pubs/bathy/B_12_Ed.2.0.3_2020-FR.pdf
https://www.pdfprof.com/PDF_Image.php?id=20686&t=25#google_vignette
<https://www.edgetech.com/product/6205s-combined-bathymetry-side-scan-sonar/>
<https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html>
<https://www.echologger.com/products/single-frequency-echosounder-deep>
https://queenhobby.com/PD710574-f450_quad_copter_frame.html
<https://www.pinterest.fr/pin/609815605769034513/>
<http://passionduciel.wifeo.com/documents/cours-meteo-2-du-09-02-2018.pdf>