



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université ZIAN ACHOUR - DJELFA -
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Agronomiques et Vétérinaires



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du diplôme de
Master en Sciences Agronomiques et Vétérinaires

Spécialité : Eau et Environnement

THÈME

*Taux d'envasement et capacité de
rétention du barrage
Cas de barrage de Zardezas, Skikda*

Encadreur : BOULEKNAFET ZOHIR

Présenté par :

- *Brahimi Maroua*
- *Fdoul Djamilia*

Devant le jury

Président : Pr : EL AHCENE Omar U.Z.A Djelfa

Examinateur : Dr : BOUTELDJAOUI Fatah « MCB » U.Z.A Djelfa

Encadreur : Dr : BOULEKNAFET Zohir « MCA » U.Z.A Djelfa

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

Au moment de terminer ce manuscrit, une évidence apparait : beaucoup de gens ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail. Nous tenons à les en remercier.

*Nous voudrions tout d'abord adresser toute notre reconnaissance à la directrice de ce mémoire, Monsieur **BOULEKNAFET Zohir**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos vifs remerciements à notre très cher parent pour leurs encouragements incessants et leur soutien moral aux moments difficiles.

Nous tenons à exprimer notre gratitude, notre profond respect et notre remerciement aux membres de jury.

Nos remerciements aussi vont à tous les enseignants et les enseignantes qui nous ont fait former durant ces 05 années, en nous préparant pour cette dernière année de master. Merci pour vos encouragements et votre gentillesse.

Maroua & Djamila

Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU

De m'avoir donné la force et le courage de mener

à bien ce modeste travail.

Je tiens à dédier ce travail à :

À la source de mon bonheur et de ma fierté,

*« Mes chers parents, **MESSAOUD** et **NACIRA** ».*

*En particulier, leurs prières et leurs conseils m'ont toujours accompagné.
Je les remercie pour tout ce qu'ils m'ont apporté (confiance, moyens et
amour) en guidant et en mettant en place tout ce qui est nécessaire pour
créer le climat propice à l'achèvement de mon travail, et je leur souhaite
une longue et heureuse vie pleine de joie, de santé.*

À Mes chères et mes compagnons, mes sœurs :

Kheira, Ahlem, Sabrina, Wissal

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

Maroua

Dédicace

Je dédie ce fruit de mes efforts à mes honorables parents

À ma chérie qui a facilité mon chemin grâce à son soutien : FDOUL NOURA

Mon soutien dans la vie est mon cher père, qui m'a toujours accompagné tout au long de mon parcours académique : FDOUL BEN SALAH

Je dédie ma réussite à la bonne âme de mon grand-père, qui attendait que j'obtienne mon diplôme : FDOUL ABD ALSALAM

*Je le dédie à tous les bons membres de ma famille et à mon compagnon de vie :
KHADIJA et ISLAM et SOUAD et ILYAS et YOUNAS et ISSA et BEN
SALEH*

Et à tous ceux qui m'ont aidé dans mon parcours académique

Djamila

Sommaire

Liste des figures
Liste des tableaux
Liste des abréviations

Introduction Générale01

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : *TRANSPORT SOLIDE*

I. ÉROSION ET TRANSPORT SOLIDE	03
I.1 Introduction	03
I.2 Généralité	05
I.3 Les principaux agents de l'érosion hydrique	06
I.3.1 Les précipitations	06
I.3.2 Le ruissellement	07
I.3.3 La topographie	07
I.3.4 Le couvert végétal	08
I.4 Les formes de l'érosion hydrique	08
I.4.1 Érosion en nappe	08
I.4.2 Érosion linéaire	09
I.4.3 Érosion en griffes et rigoles	09
I.4.4 Érosion par ravinement	09
I.5 Quantification de l'érosion hydrique	09
I.5.1 Formule de fournier (1960)	10
I.5.2 Formule de la Sogreah (1969)	10
I.5.3 Formule de Demmak (1982)	10
I.5.4 Modèle de Touiabia (2000)	11
II. Le Transport Solide	11
II.1 Les apports solides par charriage	12
II.2 Les apports solides par suspension	13
II.3 Méthodes de quantification des sédiments	13
II.4 Mesure de charriage au fond du cours d'eau	15
II.4.1 Anciennes méthodes de mesure de charriage et leur examen critique	15
II.4.2 Méthodes modernes de mesure du charriage	16
II.4.2.1 Méthode des peintures et résines	16
II.4.2.2 Méthode des traceurs luminescents	17
II.4.2.3 Méthode des traceurs radioactifs	17

II.5	Mesure des transports solides en suspension effectuée par les cours d'eau.....	17
II.6	Méthodes d'estimation des charges solides	18
II.6.1	Méthode numérique :	18
II.6.2	Méthode de régression	18
II.7	Rappel bibliographique sur le transport solide en Algérie	19
III.	Moyens de lutte contre l'érosion et l'envasement des barrages	19
IV.	Conséquences et méthodes de prévision et défense	19
IV.1	Conséquences du phénomène du transport solide	19
IV.1.1	Mécanisme de l'envasement	19
IV.2	Méthodes de prévision des apports solides	20
IV.2.1	Méthode empirique	20
IV.2.2	Méthode d'application des équations du transport solide.....	20
IV.2.3	Méthode par modélisation	21
IV.3	Méthodes de lutte contre l'érosion et le transport solide	21
CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE		
I.	PRÉSENTATION DU BASSIN VERSANT	23
I.1	Localisation géographique	23
I.2	Cadre géologique et lithologique	24
I.3	Structure géologique du bassin versant	24
I.4	Stratigraphie du bassin versant	25
II.	Conclusion	28
III.	Présentation du barrage de Zardezas	28
III.1	Caractéristiques du barrage et de retenue	29
III.1.1	Caractéristiques du barrage	29
III.1.2	Caractéristiques de la retenue	30
III.2	Caractéristiques hydrographiques du bassin de Zerdazas.....	31
III.2.1	Densité de drainage Dd	32
III.2.2	Temps de concentration	32
III.2.3	Le couvert végétal	33
III.3	Caractères physiques et morphométriques du bassin de Zerdazas	34
III.3.1	La forme du bassin versant	34
III.3.2	Rectangle équivalent	34
III.4	Caractéristiques des altitudes (le relief)	35
III.4.1	Indice de pente globale	35
III.4.2	Dénivelée spécifique	35
IV.	Interprétation des résultats hydrographique et morphométriques	36

CHAPITRE III : HYDROCLIMATOLOGIE DU BASSIN VERSANT

I.	Introduction	38
II.	Équipement hydro-pluviométrique du bassin	38
III.	Caractéristiques climatiques	38
III.1	La précipitation	38
III.1.1	Pluies moyennes mensuelles	39
III.1.2	Pluies moyennes annuelles	39
III.2	La température.....	40
III.3	Régime climatique	41
IV.	Caractéristiques hydrologiques	42
IV.1	Les écoulements	43
IV.2	Débit moyens annuels	44
IV.3	Variations des débits annuels moyens bruts	44
IV.4	Variations des débits annuels moyens spécifiques	44
IV.5	Variabilité saisonnière et mensuelle de l'écoulement	44
IV.6	Les crues	44
IV.7	Exemples des crues	45
A.	La crue de 03 Février 1984	45
B.	La crue du 25 Mai 1992	45
V.	Perte de capacité de stockage par envasement	46
V.1	Introduction	46
V.2	Envasement du barrage de Zardezas	46

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

I.	Problématique d'envasement des barrages en Algérie	49
I.1	Généralité	49
I.2	Aperçu générale sur le barrage de Zardezas	49
a)	Constat de l'envasement actuel du barrage de Zardezas	50
b)	Perte de capacité par envasement	50
I.3	Problèmes posés par l'envasement des barrages	52
1-	Réduction de la capacité	52
2-	Blocage des vannes de fond	52
3-	Envasement des canaux d'irrigation	53
4-	Impact de l'envasement sur la qualité de l'eau du barrage	54
II.	Actions engagées pour la lutte contre l'envasement des barrages	54
II.1	Aménagement des bassins versants	54

II.2 Barrages de décantation	55
II.3 Surélévation des barrages	55
II.4 Dévasement des barrages	56
II.4.1 Dévasement périodique	57
a) Soutirage des courants de densité.....	57
b) Évacuation de la vase par la vanne de fond	58
II.4.2 Dévasement occasionnel	58
a) Dragage du barrage	58
Conclusion générale	60
Références bibliographiques	63
Résumé.....	64
Abstract	64
الملخص	64

Liste des figures

Figure 01 . cycle du processus d'envasement d'une retenue.....	03
Figure 02. Diagramme de Hjulstrom (Musy, Higy, 2003).....	11
Figure 03. Modes de transport solide dans un cours d'eau. (Larfi, Remini ; 2006)	12
Figure 04. Carte de Situation géographique du bassin versant de l'oued Saf-Saf (ABH,CSM modifiée par F.Khalifaoui.2014).....	24
Figure 05. Proportion approximative (%) des diverses formations lithologiques dans le bassin de Saf-Saf	25
Figure 06. cadre géologique de la région de Skikda (J.M. Vila 1980).....	27
Figure 07. Situation du barrage ZARDEZAS	29
Figure 08 Le lac du barrage de Zardezaz (Toumi, 04/05/2016)	30
Figure 09. la digue du barrage de Zerdazas	30
Figure 10. Photo satellite du barrage de Zardezaz	31
Figure 11 Cartes du réseau hydrographique du bassin de Zerdazaz (Outil SIG).....	32
Figure 12 Représentation graphique des moyennes des Pluies annuelles (2001-2015)	39
Figure 13 moyenne des Température mensuelles des 20 dernières années	40
Figure 14 Variations des températures moyennes mensuelles à la station de Zardezaz (1987/2012). (F. Khalifaoui 2013)	41
Figure 15 Diagramme Ombro-thermique de la station du barrage de Zardezaz.....	42
Figure 16 Variation interannuelle de l'écoulement de station hydrométrique.....	43
Figure 17 Quantités de sédiment déposées au cours du temps, en tenant compte du dévasement, dans la cuvette du barrage des Zardezaz, (ANBT & Remini.B)	47
Figure 18 : Variation des volumes d'eau stockés en fonction des côtes du lac dans le barrage de Zardezaz (ANBT).....	51
Figure 19: Blocage des vannes de fond (Remini, 2011).....	53
Figure 20: Curage d'un canal par les moyens mécaniques (OPIM, 2008).....	53
Figure 21: Couleur verdâtre de l'eau du barrage de SMBA.....	54
Figure 22 : Photo d'une plantation par banquettes continues	55
Figure 23 : la drague aspiratrice en état de fonction	56
Figure 24 : La drague dans le barrage (ANBT)	59
Figure 25 : Refoulement de matériaux dragués dans le puits de la drague.....	59

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification du relief suivant l’O.R.S.T.O.M	35
Tableau 2 : Caractérisation des stations pluviométriques et hydrométrique (<i>ANRH</i>).....	38
Tableau 3 : Précipitations moyennes mensuelles	39
Tableau 4 : variation de la Pluies moyenne annuelles (2001-2015).....	39
Tableau 5 : variation des Température moyenne mensuelles des 20 dernières années	40
Tableau. 6 : moyennes des Températures mensuelles (1987/2012).....	40
Tableau 7: Variation interannuelle de l’écoulement à la station hydrométrique de Khemakhem.....	43
Tableau 8 : Volumes et surfaces aux niveaux normal et des plus hautes eaux pour les 3 levés topo-bathymétriques	50

Liste des abréviations

ANBT : Agence Nationale des Barrages et transferts

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques

ORSTOM : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer

NPHE : Le Niveau de Plus Hautes Eaux

NNR : Le niveau normal de la retenue

L'INRF : L'Institut national de recherche forestière

D_d : la densité de drainage

R_c : le rapport de confluence

R_l : le rapport des longueurs

Introduction générale

Les ressources en eau en Algérie constituent l'une des principales richesses sur lesquelles reposent la prospérité et le développement du pays. Malheureusement ces ressources sont menacées par la perte de capacité de stockage des barrages due au phénomène d'envasement.

L'envasement ou l'alluvionnement est la conséquence naturelle de la dégradation des bassins versants. Il constitue actuellement une préoccupation aux projecteurs et aux exploitants d'un pays caractérisé par un taux démographique élevé, cause nécessaire pour conserver les réserves d'eaux existantes. (*Abaoub, S. 2015*).

Depuis les années 70, un intérêt s'est accru concernant l'estimation du transport solide. Les raisons sont nombreuses et diverses, et incluent le transport de contaminant, les tendances de qualité aquatique, la sédimentation de réservoir, l'envasement de canaux et de port, l'érosion et la perte de sol, aussi bien que les impacts écologiques. Cet intérêt est motivé par l'importance des aspects quantitatifs et qualitatifs du transport solide.

Il est connu que le transport des matières en suspension se fait principalement en période de crues et que les principaux facteurs qui contrôlent la production et le transport en suspension dans les bassins versants sont dus essentiellement à l'effet conjugué de l'intensité des précipitations, la configuration du bassin versant et les caractéristiques hydrauliques du cours d'eau. (*Abaoub, S. 2015*).

Notre travail a pour finalité plus qu'une présentation monographique, une approche analytique des modalités de l'écoulement, du transport des sédiments en suspension.

Notre travail s'articule sur le plan suivant :

Une synthèse bibliographique sur les processus du transport solide, l'érosion hydrique. L'étude des transports solides en suspension et modélisation, permettra d'évaluer les quantités de sédiments transportés par l'Oued Saf-saf et par conséquent d'en tirer des conclusions quant à l'envasement des ouvrages.

Enfin, l'étude se focalisera sur la problématique d'envasement au niveau du barrage de Zardezas et l'impact de l'envasement sur le rendement du barrage, en plus de l'actions engagées par les responsables pour la lutte contre l'envasement des barrages.



Synthèse
Bibliographique

Chapitre I

Transport Solide

I ÉROSION ET TRANSPORT SOLIDE

I.1 Introduction

Le transport solide étudie les phénomènes de l'érosion, du transport et de la sédimentation des solides au sein d'un écoulement liquide. C'est un des aspects de l'hydraulique environnementale le plus complexe, et les résultats des recherches antérieures n'ayant pas abouti à l'obtention de lois générales

L'étude du transport solide est devenue essentielle dans de nombreux domaines, de l'étude des processus d'érosion et de sédimentation dans les retenues aux études sur la pollution des cours d'eau. (Abaoub, S. 2015).

L'objectif de l'étude sur : "Le Transport solide en collecteurs d'assainissement et sa modélisation" (l'un des quatre sujets principaux du programme TSRA), est le suivant : découvrir les mécanismes mis en jeu, identifier et modéliser les phénomènes.

Le transport solide par les cours d'eau est fortement lié à l'érosion de sol due à la pluie.

L'étude de l'érosion et du transport solide n'est plus réservée aux besoins du génie civil mais est utilisée aussi pour les besoins de l'agriculture, de l'environnement, des transports et de l'aménagement du territoire.

L'érosion, le transport des matériaux arrachés au bassin d'alimentation et au réseau d'écoulement, leur dépôt dans les infrastructures hydrauliques, hydro-agricoles, portuaires et routières sont un ensemble de phénomènes dont la complexité à l'échelle du bassin reste difficile à mettre en équation du fait de la diversité des facteurs aussi bien naturels qu'anthropiques mis en jeu. (Abaoub, S. 2015).

L'érosion se produit donc essentiellement sur des zones naturellement arides et semi-arides, mais également sur toute zone sur laquelle les activités humaines ont conduit à faire disparaître le couvert végétal, du fait d'une gestion inappropriée des terres cultivées (suppression de jachère), d'un surpâturage ou de la destruction intentionnelle de la végétation (déboisement, feu), généralement motivés par la poussée démographique.

L'eau s'infiltrant dans le sol peut contribuer aux éboulements et glissements qui peuvent devenir des sources principales des sédimentations pour les cours d'eau. Le processus entier peut être considéré comme un cycle continu de :

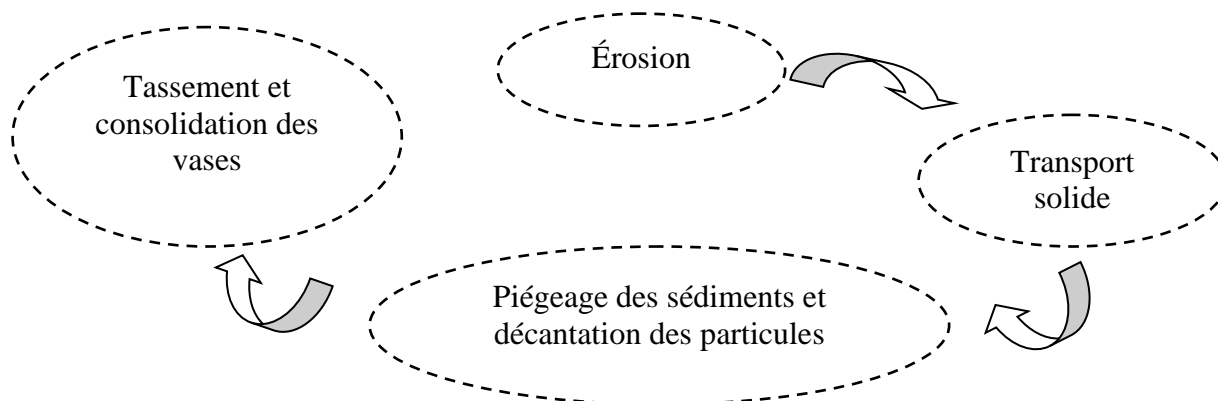


Figure 1 : Cycle du processus d'envasement d'une

L'érosion hydrique est un phénomène complexe par son caractère irrégulier, aléatoire et par sa discontinuité spatio-temporelle. En raison de son ampleur et son agressivité, elle constitue une contrainte majeure au développement de l'agriculture et à la promotion des activités rurales. (M. ACHITE, B. TOUAIBIA & S. OUILLON 2006).

Ce phénomène, est caractéristique dans la région du Maghreb dont les potentialités en eau et en sol sont sérieusement menacées, les quantités de sédiments transportés en suspension susceptibles de se déposer dans le littoral méditerranéen des côtes algériennes sont estimées à 47 millions t/an.

L'érosion hydrique reste un problème majeur en Algérie septentrionale dont le principal facteur est le ruissellement dont la répartition spatiale est contrôlée par celles des précipitations, des caractéristiques géologiques et biophysiques (topographie, couvert végétal, ...) L'érosion se manifeste principalement sur les sols en pente et constitue une des principales causes de dégradation des sols dans les massifs montagneux en zones semi arides. Elle s'est accélérée suite aux défrichements des forêts et maquis qui protégeaient les sols sensibles. (M. ACHITE, B. TOUAIBIA & S. OUILLON 2006).

L'érosion hydrique affecte 28 % des terres de l'Algérie du Nord. Ce sont les terres à fortes pentes des massifs telliens sont les plus touchées. L'érosion se manifeste par la formation de rigoles et de ravines sur tout le versant avec affleurement de la roche-mère et une évolution en bad-lands (Hadjiat, 1997).

En général, l'érosion spécifique varie entre 2000 et 4000 t/km²/an, l'Algérie est de ce fait l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion.

I.2 Généralité

Le nom érosion, vient du verbe « éroder » signifie ronger. Il évoque l'usure de la surface terrestre sous l'action des éléments météorologiques. Ce phénomène existe de façon permanente, il débute dès que les roches émergent et se trouvent en contact avec l'atmosphère. (*F. Fournier, 1969*).

L'érosion hydrique présente un vrai enjeu pour les pays et les régions semi-arides, non seulement par les taux très élevés de la perte en sol, mais aussi par la variabilité spatio-temporelle du phénomène, (*M. Hasbaia, A. Hedjazi & L. Benayada 2010*).

L'aspect le plus important de l'érosion est l'érosion pluviale et plus précisément l'érosion par ruissellement. Les terrains étant nus (déboisement, jachère, labour...), le ruissellement qui fait suite aux averses torrentielles décape progressivement les horizons supérieurs du sol. Les facteurs favorisant l'érosion sont nombreux : pente, nature des roches, pratiques culturales, relief, climat...etc.

En région méditerranéenne, et notamment en zone semi-aride, le climat est le premier responsable du phénomène, avec les variations spatiotemporelles brusques observées, de la pluie et des écoulements, l'action du gel et du dégel, le pouvoir évaporant du sirocco. Les facteurs anthropiques ont participé de façon remarquable à la dégradation des sols par les incendies, les défrichements, le morcellement du foncier, le surpâturage, ...rendant les bassins versants très vulnérables au ruissellement. (*B. Touaibia 2010*).

L'érosion se produit donc essentiellement dans des zones naturellement arides et semi-arides, mais également sur toute zone sur laquelle les activités humaines ont conduit à faire disparaître le couvert végétal, du fait d'une gestion inappropriée des terres cultivées (suppression de jachère), d'un surpâturage ou de la destruction intentionnelle de la végétation (déboisement, feu), généralement motivés par la poussée démographique. (*LA Houille Blanche 1998*).

L'intensité de l'érosion hydrique varie d'une zone à l'autre. La partie Ouest du pays est la plus érodée, où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres ; suivie du centre (27%) et de l'Est (26%). L'érosion spécifique varie de 2000 et 4000 (t/km²/an) et le taux d'envasement est supérieur à 15 %. L'Algérie est de ce fait l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion. (*B. Touaibia 2010*).

Il existe deux grands types d'érosion, liés à deux grands types de ruissellement :

- **L'érosion diffuse** : La lame d'eau qui ruisselle est de faible épaisseur avec une vitesse d'écoulement faible. Cette lame d'eau n'est pas capable d'arracher des particules de terre,

seules les particules issues de la désagrégation due aux gouttes de pluie (effet splash) sont entraînées. C'est une érosion qui concerne de grandes surfaces

- **L'érosion concentrée** : Si la vitesse de ruissellement est forte, des incisions se forment dans le sol, les particules de sol sont arrachées par cette lame d'eau concentrée, et forment des rigoles, voire des ravines.

Les deux types d'érosion peuvent se rencontrer dans un même bassin versant (*P. Joséphine & L. Isara 2013*).

Les différentes formes d'érosion représentent le résultat d'une combinaison spécifique de processus de détachement et de transport (*F. Dennis 2008*).

Les écoulements torrentiels arrachent les particules du sol, les transportent dans les oueds pour les décantent dans les barrages.

L'envasement excessif de la plupart des grands barrages algériens a considérablement limité leur volume utile et donc leur capacité réelle de stockage. Bien que le transport solide par l'eau de pluie et de ruissellement soit un processus naturel, il est fortement accentué par les activités anthropiques. (*B. Remini et al, 2016*).

Les barrages subissent un envasement lié à une érosion importante. L'envasement de ces barrages limite drastiquement leur capacité et donc leur durée d'exploitation. Lorsqu'ils sont utilisés pour la recharge de nappes phréatiques, les lâchers entraînent la remise en suspension des particules fines qui s'accumulent au niveau des zones de recharge et réduisent la capacité d'infiltration par colmatage de la porosité du sol, ce qui conduit à un abatement important des niveaux piézométriques. (*O. DEBAUCHE et al, 2016*).

En Algérie, les chercheurs de l'INRF et de l'ORSTOM ont mesuré des pertes en terre par érosion en nappe de 0,1 à 20 t/ha/an, 5 à 60 t/ha/an pour l'érosion mécanique sèche par les travaux culturaux motorisés (*Roose et al.1993*), et 90 à 300 t/ha/an pour le ravinement (*Chebbani & Belaidi,1997*).

I.3. Les principaux agents de l'érosion hydrique

I.3.1 Les précipitations

Tout transport de terre nécessite une énergie, pour l'érosion hydrique sur les versants de pente faible et moyenne, c'est l'énergie des gouttes des pluies qui déclenche le processus de destruction des agrégats du sol, tandis que le ruissellement n'assure que le transport des particules détachées. Cependant lorsque la pente augmente, le ruissellement devient lui-même abrasif et son énergie dépasse celle de la pluie au-delà de 15 % (*E.J. Roose & F. Lelong, 1976*).

Une pluie est caractérisée par son volume (pluviosité), son intensité (I) et sa durée (T). L'intensité est le paramètre le plus important. D'une part, elle joue sur le débit

du ruissellement, et donc sur le détachement et la capacité de transport de l'écoulement, et d'autre part, elle influence directement le détachement des particules du sol.

L'énergie cinétique d'une goutte de pluie lors de son contact au sol est :

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (1)$$

Avec :

E_c : Energie cinétique (joule)

m : Masse de la goutte (kg)

V : Vitesse en m/s.

L'intensité des précipitations

C'est une caractéristique importante de la pluie ; d'une part elle affecte sur le débit du ruissellement, et donc sur le détachement et la capacité de transport de l'écoulement, d'autre part elle influe directement le détachement du sol par l'effet splash, puisque les gouttes de pluie à forte intensité ont tendance à être plus grosses que les gouttes de pluie à faible intensité (*F. Dennis 2008*).

I.3.2 Le ruissellement

Le ruissellement est le plus important agent de transport et dans certains cas le principal agent de détachement dès lors que le volume non infiltré dépasse la capacité de rétention superficielle du sol (*Camuzard, 2003*)

Quand le sol ne peut plus absorber l'eau des précipitations, une lame d'eau se forme à sa surface, correspondant à l'eau en excès, la mise en mouvement de cette eau forme le ruissellement.

Le ruissellement a deux origines :

- Lors de pluies intenses (comme les pluies d'orage), la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol est inférieure à la quantité d'eau arrivant au sol dans le même laps de temps.

- Si le sol est saturé d'eau, il ne peut plus infiltrer et absorber l'eau arrivant au sol (*P. Joséphine & L. Isara 2013*).

Le ruissellement ne débute qu'après un cumul pluviométrique journalier de 18 à 20 mm (*Laouina, A. 1998*) sur sol sec même si les pluies sont intenses ou après un cumul de 4 mm sur sol humide et compact (*R. Chibbani, et al, 1997*).

I.3.3 La topographie (Effet de la pente)

L'érosion est étroitement liée aux types et aux caractéristiques topographiques. Sur les pentes fortes, l'eau de pluie ruisselle vite et cause une érosion grave. Sur les pentes concaves, l'érosion est moins intense tandis que sur les pentes convexes, la perte en terre est plus grande que sur les pentes rectilignes.

La longueur de la pente est moins importante que son gradient et sa forme, mais à précipitation égale, il s'accumule sur une pente plus longue un plus grand volume d'eau et le temps d'absorption par le sol est plus grand donc moins de ruissellement et d'érosion (*Boukheir, 2001*).

L'influence de la pente est complexe. Tous aménagement antiérosif doit donc avoir comme objectif la diminution de l'énergie de ruissellement des terrains en pente faible à moyenne, en particulier dans les plaines ou il y a des ravins qui déversent leurs eaux dans la retenue du barrage. Il se développe une érosion en rigoles dix fois plus agressive que l'érosion en nappe (*Roose et al 1998*).

I.3.4 Le couvert végétal

Il est de loin le facteur le plus important. La végétation vivante protège la surface du sol de l'impact des gouttes de pluie, et donc du détachement par le splash ; les tiges et troncs forment des obstacles qui ralentissent la vitesse de ruissellement, ce qui réduit le détachement par le ruissellement ainsi que sa capacité de transport.

Les racines forment un réseau près de la surface qui tient le sol en place, augmentant ainsi sa résistance au détachement. Les feuilles mortes et débris végétaux protègent la surface de l'impact des gouttes, ralentissent le ruissellement, et ajoutent de la matière organique au sol, ce qui le rend plus résistant à l'érosion. (*F. Dennis 2008*).

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 tropicales et l'inclinaison de la pente. La mise à feu de la savane, surtout si elle est tardive, augmente très sensiblement le ruissellement et sa charge solide (*E.J. Roose 1974*), 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.

I.4 Les formes de l'érosion hydrique

I.4.1 Érosion en nappe

Une fois que les particules sont préparées par l'effet splash, le ruissellement se déclenche lorsque l'intensité devient supérieure à la vitesse d'infiltration. Une couche mince de sol uniforme est entraînée par le ruissellement avec des vitesses relativement faibles sur pentes douces (*Xiaoqing, 2003*).

En région méditerranéenne, l'érosion en nappe reste modeste quelle que soit la pente étant donnée la richesse de la surface des sols en argile et/ou en cailloux (souvent calcaire), la stabilité des agrégats saturés en Calcium. (*Roose et al.,1993 ; Kouri et al., 1997*), (*Heusch 1970*) sont arrivait aux mêmes conclusions dans le Pré-rif Marocain, à savoir que l'érosion

linéaire est beaucoup plus efficace que l'érosion en nappe en milieu montagnard méditerranéen.

I.4.2 Érosion linéaire

L'érosion linéaire par l'énergie de ruissellement se manifeste par des griffes (centimétriques), des rigoles (quelques décimètres) ou des ravines de 50 cm de profondeur (on ne peut plus les effacer par les techniques culturales), des ravins de plusieurs mètres de profondeur et des « bad-lands » ou ravinement généralisé, lorsque la surface primitive a complètement disparu.

I.4.3 Érosion en griffes et rigoles

Une érosion par rigoles survient lorsque l'érosion superficielle n'est pas maîtrisée sur un terrain en pente. L'eau de ruissellement creuse alors les couches arables, et de petits canaux ou rigoles se forment. L'écoulement se concentre dans des chenaux plus ou moins grands et l'énergie cinétique du ruissellement est suffisante pour détacher les sédiments de la surface du sol (*Jean-François Fortier, 2006*).

Elle se produit lorsque l'écoulement d'eau se concentre et choisit son passage, dès qu'une griffe s'établit, l'eau de ruissellement tend à se réunir, plus elle se creuse, plus il y'a appel d'eau dans la rigole. Ainsi le phénomène de creusement s'accélère de lui-même. De point de vue quantitatif, ce type d'érosion reste dans les mêmes proportions que l'érosion en nappe.

I.4.4 Érosion par ravinement

L'érosion en ravines est l'enlèvement de terre le long des conduites de drainage par le ruissellement des eaux de surface. À moins que des mesures ne soient prises pour stabiliser la perturbation, les ravines continueront à se déplacer par érosion régressive ou par affaissement des parois latérales. Il est beaucoup plus facile et plus économique d'effectuer des travaux de réparation dans les premiers stades des ravines nouvellement formées. Les grandes ravines qui n'ont pas été contrôlées sont difficiles et coûteux à réparer. (*Jean-François Fortier, 2006*).

En Algérie l'érosion ravinement a déplacé 90 à 300 t/ha/an, en fonction du volume des pluies, de la vitesse d'altération des versants (8 à 17 mm/an), de la pente et de la couverture de la surface du sol. (*Roose, 1999*).

I.5 Quantification de l'érosion hydrique

Il existe plusieurs formules qui relient les facteurs qui causent l'érosion et ceux qui minimisent le phénomène. Parmi ces formules on cite :

I.5.1 Formule de fournier (1960) (MOKHTARI *El Hadj* 2017)

$$As = \frac{1}{36} \left(\frac{P^2}{Pa} \right)^{2,65} \left(\frac{H_{moy}^2}{s} \right)^{0,46} \quad (2)$$

Avec :

Q_s : l'apport solide moyen inter annuel (T/Km2 .an).

P : la pluviométrie du mois le plus arrosé (mm).

H_{moy} : l'altitude moyenne (mm).

P_a : la pluviométrie moyenne inter annuelle (mm).

S : la superficie du bassin versant (Km²).

I.5.2 Formule de la SOGREAH (1969) (*Oudni Amira* 2017)

Basée sur les données de 30 bassins Algériens, la formule est :

$$Ass = a \cdot E^{0,15} \quad (3)$$

Avec :

Ass : apport solide spécifique (t/km²/an)

a : coefficient dépendant de la perméabilité du sol

E : écoulement annuel (mm).

I.5.3 Formule de Demmak (1982)

$$Tss = 26,62I_e + 5,07I_p + 9,77C_t - 593,56 \quad (4)$$

Avec :

Tss : transport solide spécifique moyen annuel (t/km². an)

I_e : indice lithologique (%)

I_p : indice des précipitations (%)

C_t = coefficient de torrentialité. ($C_t = D_d \cdot F_1$)

Dont :

$$D_d = \frac{\sum Lx}{A} \quad (5)$$

$$F_1 = \frac{N_1}{A} \quad (6)$$

Où : D_d : la densité de drainage donnée par la formule (5) et exprimée en (km/km²)

l_x : longueur totale de tous les cours d'eau dans le bassin versant (Km)

A : la superficie du bassin versant en (km²)

F_1 : dénote la fréquence des talwegs d'ordre 1 à la surface du bassin versant

N_1 : nombre de talweg d'ordre 1 dans le bassin versant

ette formule est applicable dans les conditions suivantes :

$$I_e > 10\%$$

$$I_p > 300$$

I.5.4 Modèle de Touiabia (2000)

Ce modèle est basé sur la recherche d'une relation fonctionnelle entre le débit solide (Q_s) et le débit liquide (Q_l) à différentes échelles spatiales, pour identifier les différentes formes d'érosion. Il en résulte que le modèle statistique puissance à toutes les échelles spatiales explique 80% de la variation totale. (Abaoub, S. 2015).

$$Q_s = f(Q_l) \quad (\text{Tonne/an}) \quad (7)$$

II. Le Transport Solide

C'est le deuxième processus constituant l'érosion hydrique. Il est par définition le volume de matériaux transportés par le courant par unité de temps, il s'exprime en m^3/s .

Le transport solide dans le cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion, la dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés par le réseau d'écoulement dépend essentiellement par le champ d'exploitation des vitesses varie tout au long du profil de l'oued, de l'amont vers aval. (O. Amira 2017)

Ce phénomène est limité par la quantité de matériaux susceptible d'être transportée. Il est principalement réglé par deux propriétés du cours d'eau :

a) **La compétence** : Elle est mesurée par le diamètre maximal des particules que peut transporter le cours d'eau (Musy, Higy, 2003). Cette caractéristique est fonction de la vitesse d'eau comme le montre le diagramme de Hjulstrom qui divise le transport solide en trois phases : la sédimentation, le transport avec une fonction croissante qui est toujours au particules (l'érosion).

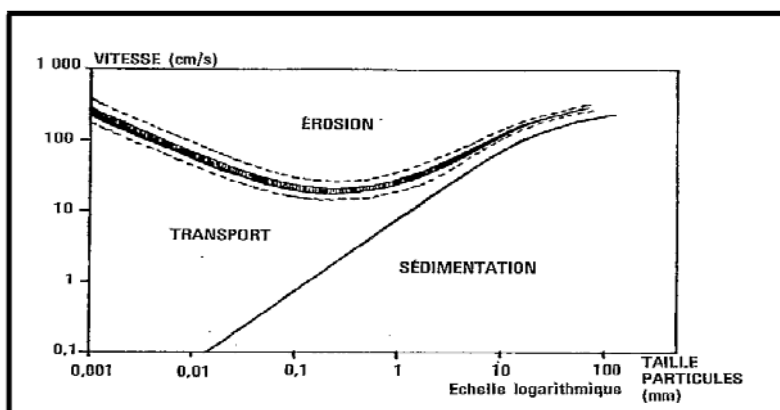


Figure 2 : Diagramme de Hjulstrom (Musy, Higy, 2003).

b) La capacité : C'est la quantité maximale de matériaux solides que peut transporter en un point et à un instant donné le cours d'eau. La capacité est fonction de la vitesse de l'eau, du débit et des caractéristiques de la section (forme, rugosité, etc.) (Hug. M, 1975). (O. Amira 2017)

II.1 Les apports solides par charriage

Le charriage est un mouvement des grains près du fond par roulement ou glissement des grains les uns sur les autres ou par petits sauts, le charriage est un déplacement mais bien sûr pour qu'il y ait déplacement il faut qu'il y ait d'abord arrachement des grains, ces déplacements sont dus à la traînée et à la portance.

Formée de matériaux trop gros pour être mis en suspension suite à leur densités la vitesse du courant, ces particules roulent au fond (charriage) ou se déplacent par saltation qui correspond à un déplacement par bonds successifs (Musy, Higy, 2003).

La charge de fond même si elle joue un rôle considérable dans les problèmes de profil d'équilibre et de stabilité des lits, n'entre que pour une part négligeable dans les volumes des sédiments transportés si ce n'est dans des conditions particulières (torrents de montagne ou rivières torrentielles de piémont) (B, Petit, 2000).

Le débit charrié dans les retenues Algériennes est estimé entre 10 à 15% du débit en suspension. En France, par exemple, le flux du transport spécifique moyen par charriage avoisine 35 ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$) à Serre Ponçons, il descend aux environs de 20 ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$) à Cadarache, il était de 25 ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$) à l'ancienne prise de Briliane sur le Verdon, le flux à hauteur de Greoux est de 25 ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$) (Rimini, 2005).

La part du charriage est donc souvent négligée car mal connue, elle est estimée entre (15 et 25)% de la suspension. (Larfi, Remini, 2006).

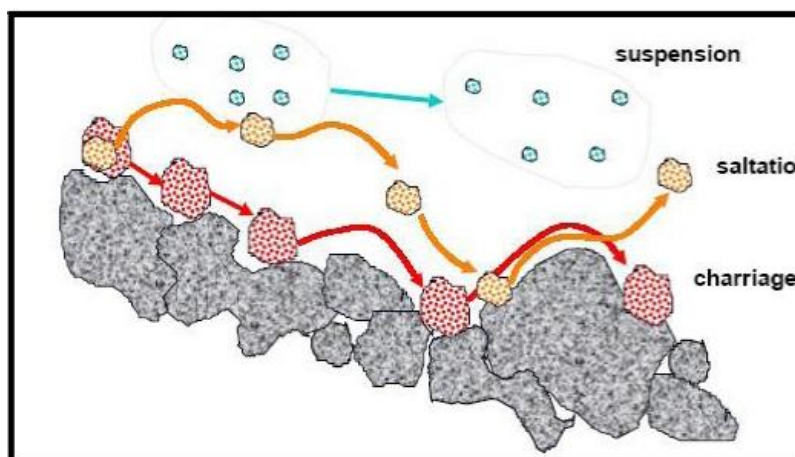


Figure 3 : Modes de transport solide dans un cours d'eau. (Larfi, Remini ; 2006)

II.2 Les apports solides par suspension

Constituée de matériaux dont la taille et la densité leur permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sans toucher le fond du cours d'eau, elle est constituée d'éléments fins, généralement c'est la fraction du débit solide qui puisse être mesurée facilement (*Musy e, Higy, 2003*), quantitativement elle représente la portion la plus importante du transport solide totale, elle représente près de 90% de la dénudation totale dans les environnements arides (*P. Bravard, 2000*).

II.3 Méthodes de quantification des sédiments

Les matériaux fins sont facilement amenés en suspension par la turbulence de la rivière, et ils circulent à peu près à la même vitesse que l'eau (*Benkhaled, 2006*). La concentration des matériaux fins dans l'eau dépend de la quantité fournie par le bassin versant, quantité qui est-elle même liée aux précipitations.

Cette concentration ne dépend qu'indirectement du débit ou de la capacité de transport du cours d'eau, puisque la concentration en matériaux fins peut varier énormément avec le temps (des variations dans un rapport de 100 à 1000 sont fréquentes (*Benkhaled, 2006*), la plupart des erreurs commises dans l'échantillonnage sont dues à un nombre de mesures insuffisant pour déterminer ces fortes variations.

Le calcul des concentrations en matériaux fins exige normalement le prélèvement d'un mélange d'eau et de matériau, le tri et la pesée des matériaux. La plupart des appareils fonctionnent manuellement. Le fait que les appareils de prélèvement de matériaux en suspension ne récoltent qu'un petit échantillon constitue un inconvénient. La plupart des méthodes traditionnelles de prélèvement est de calcul de la concentration exigent une grande quantité de matériaux, alors que les appareils électroniques récents n'ont besoin que d'un petit échantillon (*Benkhaled, 2006*).

Plusieurs hydrauliciens et géomorphologues ont cherché à établir des relations permettant d'estimer le transport solide des cours d'eau. Parmi les nombreuses méthodes trouvées dans la littérature spécialisée, on a des méthodes purement empiriques jusqu'à des modèles théoriques complexes.

Certains estiment la quantité des sédiments transportés de façon directe, d'autres de façon indirecte en utilisant comme données les paramètres hydrauliques de la section ou du tronçon d'étude et les caractéristiques du matériel de fond.

Un des méthodes appliquées pour déterminer le transport solide consiste à utiliser des pièges à sédiments (*Helley et Smith, 1971 ; Klingeman et Milhous, 1971 ; Ryan et Troendle, 1997, Ryan et Porth, 1999*),

Dans cette méthode, le volume de matériel transporté par l'eau est déterminé en fonction de la relation entre la quantité de sédiment capturé dans le piège pendant une période donnée ou un événement, ce qui permet d'effectuer des mesures directes de flux sédimentaires.

Pour obtenir la quantité de matériel transporté, les matériaux accumulés dans les trappes doivent être séchés et pesés, ce qui permet un calcul du flux sédimentaire moyen par unité de temps.

La mesure du débit charrié est extrêmement difficile. Des échantillonneurs sont employés pour le mesurer. Malheureusement, la quantité de matériaux charriés est extrêmement sensible à la vitesse locale du courant, et il est impossible d'installer un appareil dans l'écoulement sans perturber la vitesse du courant près de l'appareil.

D'autres techniques sont employées, telles que les pièges à cailloux selon (Emmet, 1980), ou les itinéraires de traceurs suivant (Sayre et Hubbel, 1963 ; Tool, 1976). Ces méthodes permettent d'obtenir des résultats relativement précis, mais elles nécessitent des prélèvements effectués pendant d'assez longues périodes.

Le débit charrié est souvent calculé aussi à l'aide des formules basées sur les propriétés des matériaux solides et sur l'hydraulique des écoulements à surface libre. Le choix de telle ou telle formule est très difficile.

Cependant, avec l'avènement et le développement de l'informatique et de ses moyens de calcul, de grands progrès ont été accomplis, parmi les équipements de mesures actuellement disponibles, on peut décrire :

- Les nasses constituées d'une poche de grillage montée sur un cadre métallique qui laisse passer les matières en suspension, mais retient les matériaux grossiers
- Les pièges constitués de récipients très aplatis de section longitudinale triangulaire dont le bord correspondant au sommet du triangle est dirigé vers l'amont. À l'opposé dans la partie supérieure aval du récipient, une série de petites cloisons inclinées vers l'aval constitue le piège où viennent se prendre les matériaux (sable essentiellement)
- Les sondeurs à ultrasons permettent de suivre le déplacement des dunes dans les fonds sableux à faibles pentes.

Le phénomène du transport solide est peu connu à cause des grandes difficultés rencontrées dans la réalisation des mesures directes. Ces difficultés augmentent en fonction des dimensions du matériau de fond, des sédiments transportés, ainsi que du fait qu'ils présentent toujours, une grande variabilité spatio-temporelle et une durée limitée en phase de crue.

II.4 Mesure de charriage au fond du cours d'eau

La mesure de la quantité de matériaux charriés sur le fond du lit des cours d'eau constitue encore à l'heure actuelle un problème complexe qui est loin d'être résolu. La gamme des éléments soumis dans ce cas la mesure s'étend des sables jusqu'à des matériaux de grosse taille, voire même des blocs rocheux dans les parcours montagneux, en passant par les graviers.

Jusqu'en 1953-1954, d'anciennes méthodes de mesure étaient seules employées. Depuis cette époque, de nouvelles méthodes, fondées sur les traceurs luminescents ou les traceurs radioactifs, ont fait leur apparition et ouvrent une nouvelle voie d'investigation. (*Lasfar, H. 2016*)

II.4.1 Anciennes méthodes de mesure de charriage et leur examen critique

Les méthodes sont de différents genres.

1) Il faut tout d'abord tenter d'appliquer aux cours d'eau des formules semi-théoriques pour calculer les transports solides qu'ils effectuent par traction sur le fond de leur lit. Cette application représente une extrapolation posée et les hydrologues recherchèrent des méthodes de mesure directe du charriage par prélèvement d'échantillons.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer le débit solide par charriage. La plus directe d'entre elles est de disposer d'une trappe sur la largeur du lit de l'oued (transversalement), qui va piéger des sédiments et à l'aide d'un pompage, on connaîtra le volume charrié.

2) Les capteurs d'échantillon les plus connus sont les « nasses de prise en rivière ».

Une nasse de prise en rivière consiste en un récipient de capture des éléments solides, l'eau peut le traverser, elle pénètre à l'amont et ressort à l'aval mais rencontre dans son parcours à travers le récipient, un système de retenue des éléments solides qu'elle tracte.

3) D'autres solutions ont été apportées au problème de la capture des éléments charriés par les cours d'eau, en vue de leur évaluation quantitative. L'une d'elles a consisté à placer sur le fond du lit des chicanes. Celles-ci étaient calculées et placées de telle manière qu'elles provoquaient une turbulence suffisante pour mettre en suspension les matériaux simplement tractés. Ainsi on espérait faciliter leur capture, mais les critiques faites à propos des nasses restent entièrement valables pour les chicanes.

4) Les ouvrages de dessablage ont été également proposés dans certains cas comme moyens de mesure du charriage. On peut citer parmi eux le « tube tourbillon » mis au point à la Station Expérimentale de l'Agriculture du Colorado à FORT COLLINS (USA), ou un ensemble de tubes tourbillons et de déflecteurs.

5) Devant ces difficultés, une solution d'un autre genre a été recherchée dans la cubature des dépôts dans des retenues naturelles ou dues à l'homme. La mesure du volume des matériaux déposés pendant un temps donné dans une retenue, liée à la connaissance de ce qui peut s'échapper à l'aval de celle-ci, semble, a priori, pouvoir conduire à une connaissance des transports solides totaux du cours d'eau qui s'y jette.

L'estimation des transports en suspension à l'amont de la retenue peut introduire une estimation du charriage, en effet, les dépôts dans une retenue sont mesurés en volume, le débit solide d'un cours d'eau est mesuré en poids. Pour calculer, dans cette condition, un débit solide total ou retrancher une suspension d'un dépôt, il faut transformer l'une ou l'autre mesure au moyen de la densité apparente des éléments. Or la densité apparente d'une masse d'éléments, surtout s'ils sont fins, varie avec le dépôt et le tassement de cette masse sous l'eau. Il ne semble pas que des connaissances certaines soient déjà acquises sur l'augmentation de la densité apparente d'un ensemble de matériaux de taille donnée en fonction du temps et de la profondeur de son dépôt.

II.4.2 Méthodes modernes de mesure du charriage

Ces nouvelles méthodes, ne visent plus à une évaluation quantitative directe des transports solides effectués par les cours d'eau, sur le fond de leur lit. Elles conduisent à l'étude d'un problème fondamental, qui est le mouvement des matériaux eux-mêmes, complétée par la recherche des moyens pour passer de l'analyse qualitative des déplacements à une détermination quantitative de ceux-ci. La répartition dans le temps et dans l'espace des éléments marqués permet de déterminer la vitesse et l'importance des mouvements.

Les nouvelles méthodes de mesure du charriage diffèrent entre elles par le procédé de marquage adopté, les procédés actuels étant :

- le marquage par peintures ou résines
- le marquage par matières colorantes luminescentes
- le marquage par isotopes radioactifs.

II.4.2.1 Méthode des peintures et résines

Cette méthode est l'une des plus simples techniques, elle consiste à enduire les matériaux soumis à l'étude d'une matière qui y adhère fortement, et qui résiste bien à l'abrasion et dont les pigments présentent une grande stabilité chimique à l'eau. Ces nécessités ont conduit à l'emploi de résines synthétiques. Après l'immersion des éléments marqués, leur reconnaissance au milieu de matériaux prélevés à des temps et à des distances données, est simplement visuelle.

Ce procédé de marquage est peu coûteux et permet de traiter de très grosses quantités de matériaux, mais il est obligatoire de ne pas changer la densité des éléments marqués afin de ne pas perturber leurs propriétés de déplacement dans l'eau. En conséquence la couche de marquage doit être de faible épaisseur par rapport aux dimensions des éléments marqués. Ceci limite l'emploi des peintures et résines à l'étude du déplacement des galets naturels.

II.4.2.2 Méthode des traceurs luminescents

Cette méthode nécessite des phénomènes lumineux produits par des sédiments enduits d'un produit colorant luminescent quand ils sont éclairés par rayonnement ultra-violet. Dans ce cas, les sédiments enduits, se distinguent nettement, sous forme de points lumineux, sur le fond sombre, des sédiments non colorés.

La netteté du contraste est tellement grande que le nombre des sédiments marqués contenus dans un prélèvement de 1g 5 peut être déterminé en 2 à 3 minutes pour un rapport de 1/105 entre grains marqués et non marqués.

L'application de cette méthode comporte le prélèvement d'une quantité déterminée de sédiments au lieu d'étude, leur marquage et leur remplacement à l'endroit du prélèvement sous une forme (par lignes, par points etc...) qui dépend de l'étude envisagée.

Les sédiments marqués sont déplacés à des distances et avec des vitesses qui caractérisent les mouvements de l'ensemble sédimentaire. Ces mouvements ne peuvent être reconnus que par prélèvements d'échantillons car les matériaux doivent être séchés et placés sous une lumière ultraviolette.

Le prélèvement de tranches horizontales d'épaisseur, de longueur et de largeur données (appareil de Zenkovitch), à la surface des matériaux de fond, permet d'étudier la répartition des traceurs dans le sens de l'écoulement. La prise de carottes de hauteur fixée permet l'étude de leur répartition verticale.

II.4.2.3 Méthode des traceurs radioactifs

Est la plus employée des nouvelles méthodes d'étude du charriage pour deux raisons :

- Permet l'étude d'une gamme très étendue de matériaux allant des vases aux gros galets
- Introduit l'emploi de traceurs qu'on peut détecter dans le cours d'eau lui-même sans prélèvement ; des mesures continues sont alors possibles. (Abaoub, S. 2015).

II.5 Mesure des transports solides en suspension effectuée par les cours d'eau

Cette mesure s'opère depuis plus d'un siècle à la surface du globe et les caractères capitaux des transports solides en suspension effectués par les cours d'eau ont été très vite, ce sont :

-La distribution inégale des substances solides dans une section mouillée. La turbidité varie latéralement et verticalement, la variation verticale étant plus importante que la variation latérale.

-La variation de la turbidité dans le temps, surtout au cours des crues. Cela a conduit récemment à essayer de construire des appareils réalisant des prélèvements continus pendant un laps de temps assez long.

Des appareils réalisant des prélèvements discontinus, instantanés ou intégrés pendant un court laps de temps, sont d'ores et déjà mis au point.

L'évaluation des apports solides journaliers, mensuels et annuels des cours d'eau Algériens sont effectuée par les services de l'A.N.R.H de la même manière que pour les apports liquides sur la base d'un dépouillement des enregistrements limnographiques. (*H. Lasfar, 2016*).

II.6 Méthodes d'estimation des charges solides

Plusieurs approches ont été utilisées pour calculer des charges solides à partir des données observées de concentration et de débit. Certains d'entre eux sont plus précis que d'autres ; certaines sont seulement appropriées sous des conditions spéciales. Cette brève revue est destinée à indiquer la diversité des approches qui sont employées.

II.6.1 Méthode numérique :

L'approche la plus simple est l'intégration numérique directe, cette intégration numérique est seulement satisfaisante si la fréquence de prélèvement est élevée (souvent de l'ordre de 100 échantillons par an ou plus), telle que la majorité des événements d'écoulement sont bel et bien prélevés. (Roman-Mars et al,1994) ont suggéré qu'une fréquence suffisante de prélèvement pour obtenir 20 échantillons pour un hydrogramme typique de ruissellement ait été nécessaire afin d'obtenir des estimations de charge avec une erreur inférieure à 5%.

(Yaksich et Verhoff, 1983) suggèrent 12 échantillons sur l'hydrogramme.

II.6.2 Méthode de régression

Elle développe une relation entre le débit et la concentration, basée sur les échantillons prélevés, puis emploie la relation pour estimer une concentration représentative durant les jours où il n'y pas eu de prélèvements.

L'estimation s'effectue en utilisant le débit moyen journalier comme entrée dans l'équation de régression, puis relations multivariées de régression ont été développées dans certaines études. La relation est parfois développée en utilisant le flux et le débit, plutôt que la concentration et le débit, mais les résultats sont identiques (*White, 1986*).

La plupart des estimateurs de régression sont basés sur un modèle de régression linéaire, bien que ceci soit souvent appliqué après transformation, et la transformation logarithmique

est fréquemment employée, parce que beaucoup de paramètres environnementaux ont approximativement une distribution log-normale. Les relations de régression entre la concentration ou le flux et le débit après transformation log s'appellent souvent les courbes d'étalonnage ou courbe de transport solide dans la littérature spécifique. (*Fartas, F. 2014*).

II.7 Rappel bibliographique sur le transport solide en Algérie

Grace au développement du réseau hydrométrique géré par l'agence nationale des ressources hydrauliques (A.N.R.H), un nombre important de données sur le transport solide des oueds algériens a été requis depuis 1972, ces données ont permis d'entreprendre d'importantes études quantitatives des différents phénomènes érosifs dans certains bassins versants de l'Algérie septentrionale (*Fartas, F. 2014*).

III. Moyens de lutte contre l'érosion et l'envasement des barrages

Les moyens utilisés pour lutter contre l'érosion en Algérie sont principalement :

- Le reboisement, la restauration des sols, l'implantation des banquettes, la création des petits barrages et/ou retenues collinaires, la plantation des végétations à longue tige dans les oueds, la plantation des cultures suivant les lignes de niveau.

Il est signalé qu'un programme spécial de lutte contre l'érosion a été tracé par les services des forêts, une superficie de 150 mille hectares sur le territoire national doit être reboiser dans un court à moyen terme, à un rythme de 7000 ha/an.

Pour l'envasement des barrages, plusieurs dispositifs ont été mis en place pour lutter contre ce phénomène (méthodes de chasses, soutirage par courant de densité et dragage). (*Achite, M., Touaibia, B., & Ouillon, S. 2006, May*).

IV. Conséquences et méthodes de prévision et défense

IV.1 Conséquences du phénomène du transport solide

La construction des barrages par l'aménagement des cours d'eau modifié les conditions d'écoulement du débit solide. À l'entrée de la retenue et par suite de la chute de la vitesse du cours d'eau le transport des sédiments diminue, les éléments les plus grossiers déposent immédiatement, quant aux fins ; plus légers, continuent leurs trajets en suspension jusqu'à se déposer aux eaux mortes, où ils se décantent lentement au pied amont du barrage là où les vitesses d'écoulement deviennent nulles.

IV.1.1 Mécanisme de l'envasement

L'érosion des bassins versants a des conséquences sur les aménagements du cours d'eau à l'aval. La cause principale de la perte de capacité des réservoirs d'eau, dont la plus dramatique est sans aucun doute l'envasement des réservoirs.

a) Comportement des sédiments fins

Les matériaux fins sont transportés en suspension plus loin dans la retenue, pour se déposer au fond de cette dernière en couches relativement planes. Ces dépôts se font, soit par décantation sur place, soit après leur transport par les courants de densités. Ce dépôt est fonction du régime d'écoulement en amont.

b) Comportement des sédiments grossiers

Ce sont les sédiments transportés par charriage, ils s'y déposent en forme d'un delta qui s'érige à l'embouchure du réservoir et progresse vers le barrage au fur et à mesure des apports enregistrés.

IV.2 Méthodes de prévision des apports solides

Pour prévoir la quantité de sédiments déposés dans les retenues, plusieurs méthodes sont utilisées, la plupart d'entre elles se fondent, soit directement soit indirectement sur des mesures par prélèvement d'échantillons, ou sur des levés topographiques (bathymétriques) dans les retenues. Ces méthodes sont classées en trois types :

IV.2.1 Méthode empirique

Ce sont des procédés qui s'appuient sur la prise en compte de tous les processus complexes rencontrés dans le bassin versant. Elles reposent sur des données expérimentales recueillis au bassin.

Ces méthodes sont faciles à comprendre ; leurs seuls inconvénients, si les caractéristiques hydrologiques et physiques agissant sur certaines données expérimentales utilisées pour établir les relations empiriques, sont aléatoires et ne peuvent être correctement exploitées en vue des prévisions attendues.

IV.2.2 Méthode d'application des équations du transport solide.

De nombreuses formules de transport solide sont utilisées pour estimer le taux d'apports solides. Dans des conditions d'écoulement bien précises, toutes ces formules donnent une évaluation du débit solide total ou du débit solide de charriage.

Pour la prévision à l'aide de ces formules, il faut disposer des données du terrain sur l'hydraulique du chenal et matériaux du lit, qui sont des facteurs primordiaux. Le type de données disponibles est très souvent déterminant pour choisir une équation convenable.

IV.2.3 Méthode par modélisation

a) Modèle mathématique

Grâce à l'ordinateur et malgré les possibilités de calcul à grande vitesse, l'utilisation de la modélisation mathématique pour la quantification de l'érosion de sol et du transport solide reste limitée à cause de la complexité de quelques solutions numériques des équations mathématiques décrivant le phénomène.

L'objectif recherché par la modélisation mathématique de l'érosion des sols est de quantifier les sédiments provenant d'un bassin versant en un temps donné ainsi que sa composition.

b) Modèle physique

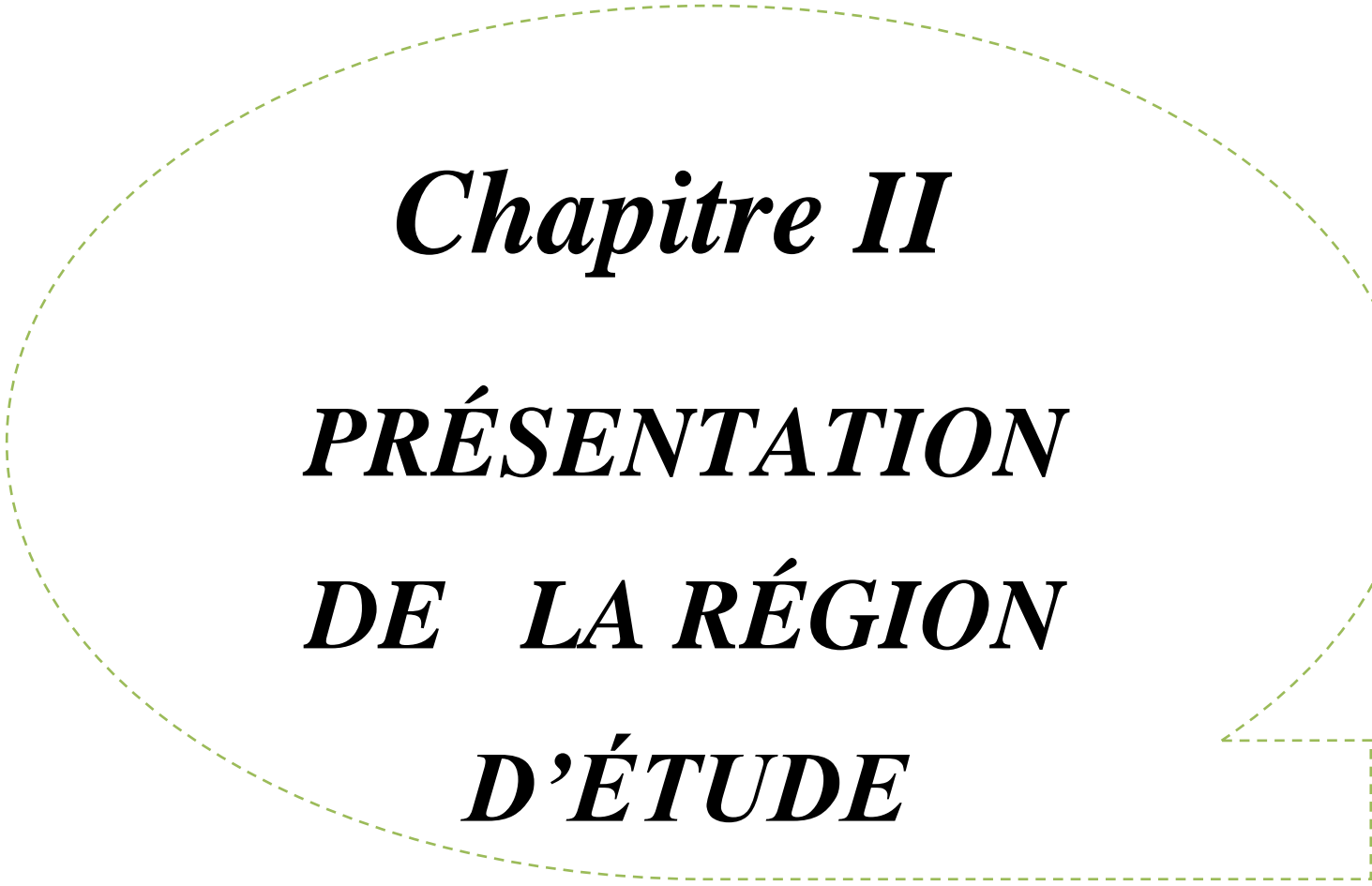
Le modèle réduit est encore un outil pour simuler les processus physiques, pour une partie du bassin ou une partie du réseau d'écoulement. La nécessité d'employer un modèle réduit résulte en général d'une difficulté de résolution des équations mathématiques décrivant un phénomène d'étude. Il reste coûteux devant le modèle mathématique.

IV.3 Méthodes de lutte contre l'érosion et le transport solide

Les méthodes de lutte contre l'érosion et la sédimentation dans le bassin versant, reposent sur l'étude de l'environnement, de leur nature et de leur évolution, afin de prévoir les dispositifs nécessaires pour réduire ou éliminer les effets négatifs des processus érosifs observés.

On peut classer les moyens de lutte contre l'érosion et le transport solide comme suite :

- Procédés agro-technique
- Restauration des forêts.
- Procédés hydrotechniques. (*Abaoub, S. 2015*).



Chapitre II

PRÉSENTATION

DE LA RÉGION

D'ÉTUDE

I. PRÉSENTATION DU BASSIN VERSANT**I.1 Localisation géographique**

Le grand bassin versant du Saf-Saf (03-09), est situé au Nord-Est de l'Algérie entre les latitudes 36°-37° Nord et les longitudes 6°30'-7° Est. Il fait partie au grand bassin côtier Constantinois-Seybouse-Mellague (CSM) (N°3), il se situe entre deux autres grands bassins versants, le bassin de Guebli (03-07) se trouvant à l'Ouest dans la région de Collo et celui de Kebir Ouest (03-11) à l'Est drainant la région de Azzaba. (Figure 4).

Au centre du bassin versant de Saf-Saf se localise le principal oued portant le même nom, il résulte de la jonction de deux grands cours d'eau : l'Oued Bou-Adjeb et l'Oued Khemakhem où on a établi le barrage de Zardezas, il franchit la chaîne numidique entre les monts M'souna (620 m) et Sébargoud (609 m), avant de se jeter dans la mer près de Skikda.

Le profil en long du cours d'eau principal montre qu'en amont, les pentes sont beaucoup plus élevées qu'à l'aval, elles sont de 11,3 m/Km au niveau de l'oued Brahim et Bou-Adjeb, et de 2,3 m/Km aux environs d'El Harrouch (*Hallaci Somia, M. L.2019*).

Il est limité au Sud par Djebel El Hadjar et Djebel Oucheni, à l'Est par Djebel El Alia et Djebel Tengout, à l'Ouest par le massif de Collo et Djebel Boukhallouf, et la mer méditerranéenne au Nord où se trouve l'exutoire principal du cours d'eau de ce bassin à la ville de Skikda, drainant une surface de 1158 km².

Le bassin du Saf-Saf est situé dans le territoire de la wilaya de Skikda, qui s'étendant sur une superficie de 4137 km². Elle se situe au Nord-Est de l'Algérie. Elle est limitée à l'Est par le massif de l'Edough (wilaya d'Annaba), au Sud et au Sud -Est par la chaîne numidienne, qui se confond avec sa limite administrative (wilayas de Constantine et Guelma), à l'Ouest par l'unité de Beni-Ferguène (oued Zhour), (wilaya de Jijel), et enfin au Nord, par la méditerranée. (*F. Khalifaoui. 2014*).

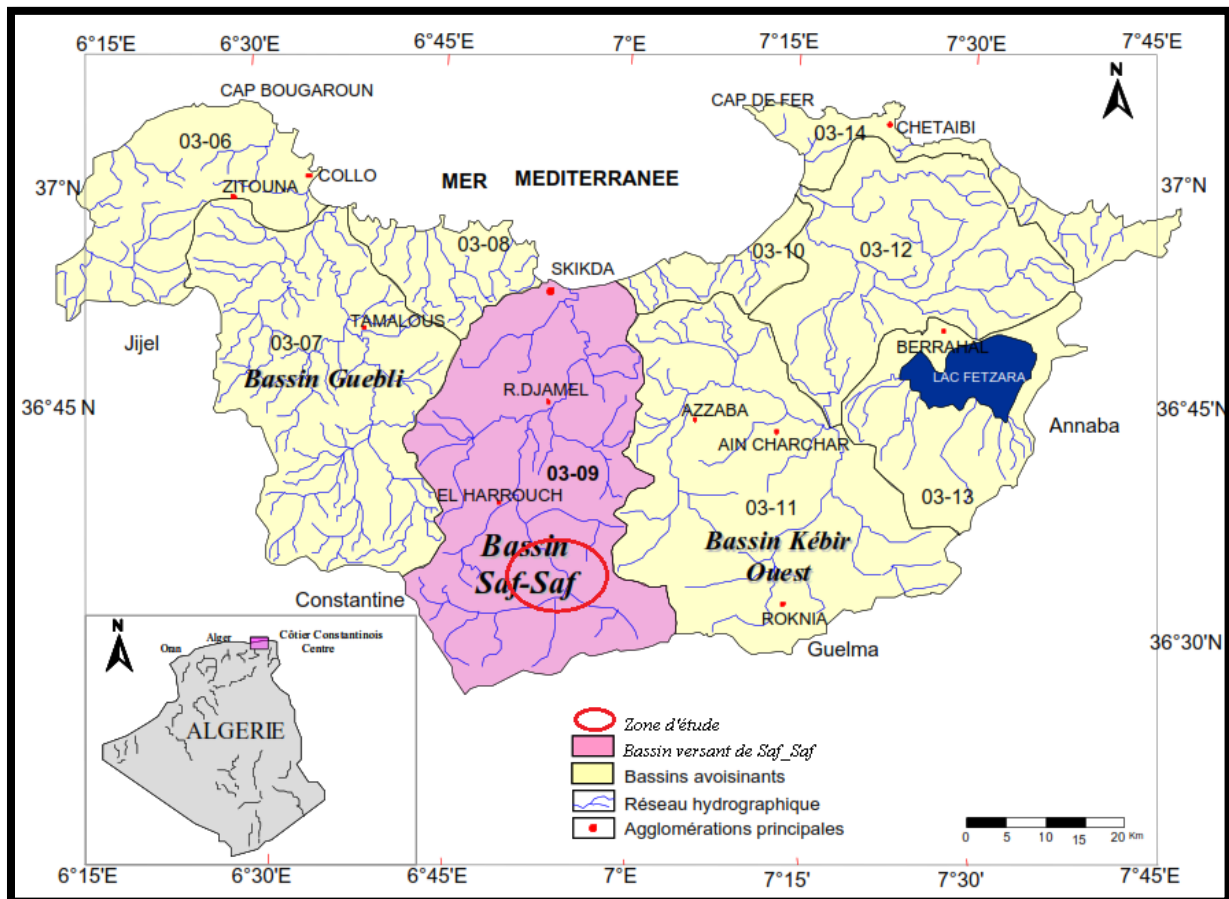


Figure 4 : Carte de Situation géographique du bassin versant de l'oued Saf-Saf

(ABH, CSM modifiée par F. Khalifaoui, 2014).

I.2 Cadre géologique et lithologique

L'étude géologique du terrain a une grande importance, le plus souvent elle est pour objet de connaître et de classer les matériaux selon leur résistance et plus ou moins leur perméabilité, de plus elle apporte beaucoup d'indications sur les caractéristiques des matériaux rocheux, indispensables à l'évaluation de l'érosion, le transport solide, et l'envasement du barrage.

La géologie des terrains influe non seulement sur l'écoulement d'eau souterraine mais également sur le ruissellement des eaux des surfaces où elle a une influence sur le comportement du réseau hydrographique.

I.3 Structure géologique du bassin versant

Le bassin versant de l'oued Saf-Saf fait partie de la chaîne des maghrébines, sa structure est très complexe, selon les études de (M. D. Delga, 1969, J. F Raoult, 1974, J.M. Vila, 1980).

Il est limité au Nord par la mole néritique constantinoise, représenté par une chaîne de calcaire massif du Crétacé de direction Est-Ouest. Les flancs Est et Ouest présentent des terrains anciens métamorphiques (micaschistes, phyllades, gneiss et marbres).

Le Nord-Est est constitué par le domaine pré kabyle à dominance calcaire. La partie intérieure est essentiellement recouverte par la nappe numidienne (grés et argiles) et par le quaternaire. Ce dernier est caractérisé par des alluvions récentes constituées de limons et de cailloux roulés au fond des vallées.

La basse terrasse débute en amont d'El-Harrouch et se poursuit jusqu'à Skikda, elle occupe une très bonne partie de la vallée principale de l'oued. La moyenne terrasse, formée d'alluvions anciennes, occupe les niveaux supérieurs des collines. (La figure 4) est une représentation schématique de la couverture lithologique dans le bassin.

Le terrain d'étude se trouve dans la petite Kabylie qui fait partie de la chaîne alpine des Maghrébines. Il s'étend entre le massif des Babors à l'Ouest et le massif de l'Edough à l'Est sur plus de 150 kilomètres le long de littoral.

I.4 Stratigraphie du bassin versant

D'après J.M. Vila (1980) on distingue du Nord vers le Sud les grandes unités structurales suivantes :(figure5)

- Le socle kabyle.
- La dorsale kabyle.
- Les séries à caractère flysch.
- Les séries telliennes.
- L'Oligomiocène Kabyle.
- Les roches éruptives.
- Le Quaternaire.

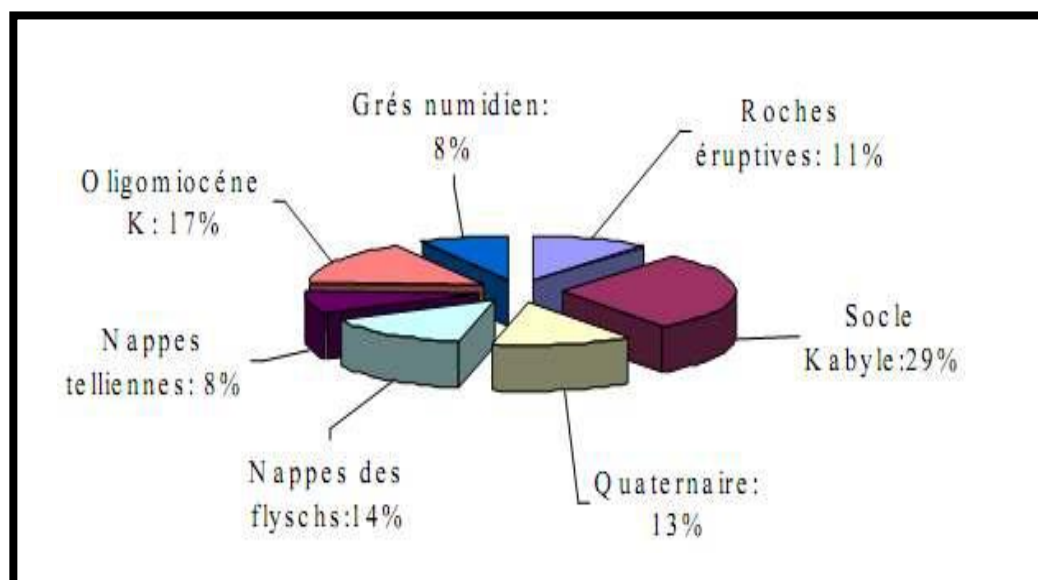


Figure 5 : Proportion approximative (%) des diverses formations lithologiques dans le bassin de Saf-Saf (S. Abaoub. 2015)

On remarque sur (la figure 6) que les formations du socle kabyle, constituées de roches métamorphiques et sédimentaires, sont les plus rependues dans la zone, avec 29 % de la totalité du terrain qui sont des formations imperméables favorisant ainsi le ruissellement des eaux, viennent ensuite les formations de l'Oligomiocène Kabyle, le Quaternaire et les nappes des flyschs avec des proportions de 17, 14 et 13 %.

Les roches éruptives, nappes telliennes ainsi que les grés numidien sont les formations les moins rependues avec des proportions de 11, 8 et 8 % respectivement

Globalement, le secteur d'étude se comporte de près de 21 % de formations perméables (formations du Quaternaire et grés numidien) et de 80 % de formations imperméables (roches métamorphiques du socle Kabyle, argiles et marnes de la série des flyschs).

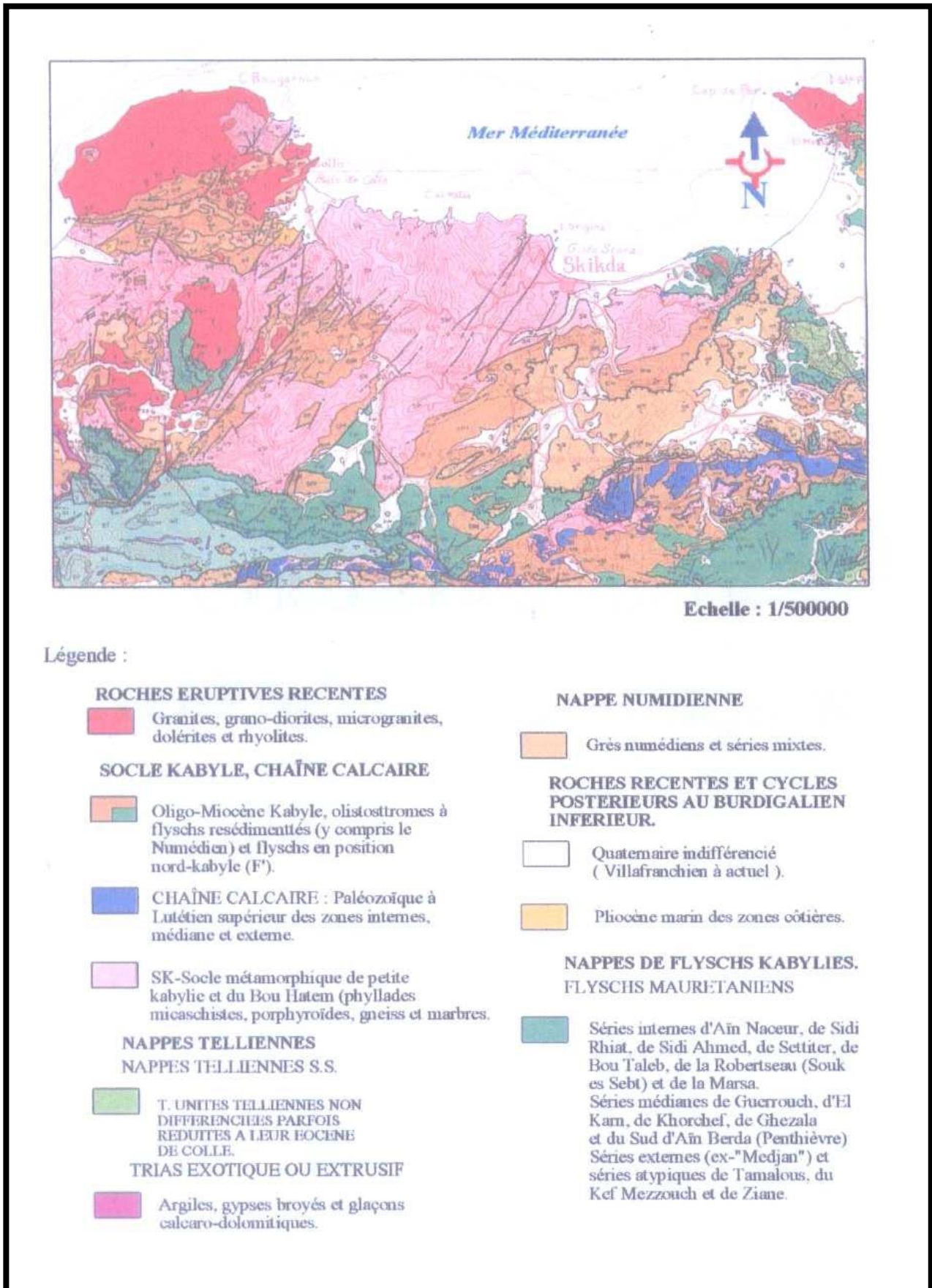


Figure 6 : Cadre géologique de la région de Skikda (J.M. Vila 1980).

V. Conclusion

Étant donné que la zone d'étude du sous bassin versant de Zerdzas appartient au grand bassin du Saf-Saf, ses caractéristiques géologiques sont les mêmes selon les études précédentes de (M. D. Delga.1969, J. F Raoult.1974, J.M. Vila.1980), cette géologie et lithologie est extrêmement complexe en raison de la tectonique cassante.

Comparée aux massifs montagneux, construits dans des massifs de roches rigides (granites, gneiss, schistes...), la géologie des différentes plaines est plutôt simple. Les limons, les marnes à lentilles gréseuses du Miocène, le grès numidien et les marnes bleues du Pliocène inférieur sont des sédiments qui ont formé le substrat imperméable du remplissage alluvial.

VI.Présentation du barrage de Zardezas

Le réservoir du barrage de Zardezas est situé dans la Wilaya de Skikda au Nord Est de l'Algérie. Il retient l'oued Saf-Saf qui s'écoule d'abord sensiblement Ouest-Est puis Sud-Est/Nord-Ouest et enfin Sud-Nord depuis les Monts de Constantine jusqu'à proximité de Skikda où il se jette dans la mer Méditerranée.

Le barrage à proprement parler se situe en amont de la ville de Zardezas entre les villes de Bou-Snib et El-Harrouch .(*Abaoub.S 2015*)

Le barrage de Zardezas est situé sur l'Oued Saf-Saf à 350 km à l'Est d'Alger et à 30 km au sud de la ville côtière de Skikda. Il assure l'irrigation de 1000 hectares du périmètre de la plaine du Saf-Saf et l'alimentation en eau potable de la ville chef-lieu et des communes de Zerdzas, El-Harrouch, Aïn Bouziane et Mdjez Edchich ainsi que la zone industrielle (Raffinerie pétrolière) de Skikda.

Le barrage de Zardezas assure également la régularisation du débit d'oued Saf-Saf contre les crues violentes qui se produisent surtout durant les moments pluvieux de l'automne, du printemps et de l'hiver. (A. Toumi. 2017).

Ce barrage, qui date de 1926, dispose d'une capacité instable au cours du temps à cause des quantités élevées des sédiments arrivant à sa cuvette. En effet, le dernier levé bathymétrique indique que sa capacité de stockage n'excède pas 18.6 millions de m³. Le barrage de Zardezas est de 74,2 m de hauteur à partir de la fondation, sa largeur à la base est de 44 m alors qu'à la crête est de 6,50 m, il a une longueur à la crête de 242 m. Le niveau normal de la retenue (NNR) se trouve à 197,30 m et celui des plus hautes eaux (NPHE) à 199,00 m. Au niveau de la digue du barrage de Zardezas quatre (4) vannettes de dévasement, de 300 mm de diamètre, sont installées à la cote 178 m. (A. Toumi & B. Remini)

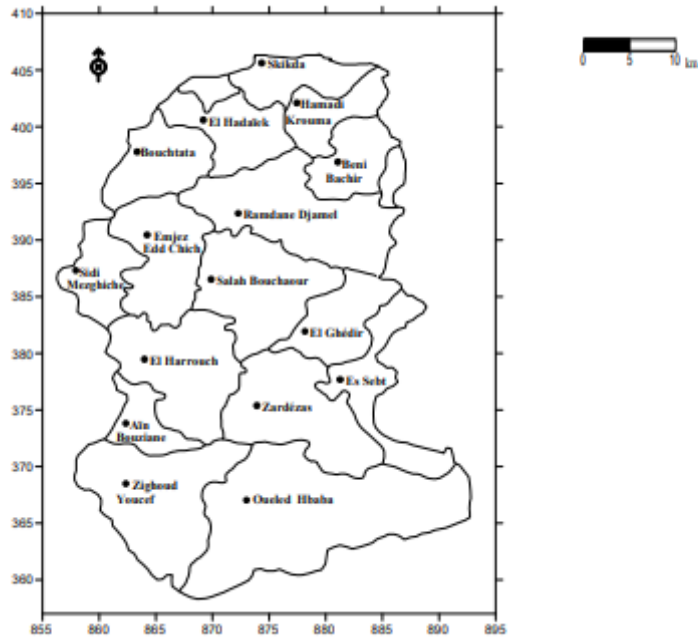


Figure 7 : Situation du barrage ZARDEZAS (F. Khelfaoui, 2014)

Le lac créé par la digue est de type étendu, après la surélévation elle s'étend sur une surface de 193,4787 hectares au niveau normal de la retenue (NNR=197,30 m) et atteindre 205,700 hectares à la cote des plus hautes eaux (NPHE = 199 m). (A. Toumi & B. Remini)

III.1 Caractéristiques du barrage et de retenue

III.1.1 Caractéristiques du barrage

Le type de la digue est en poids caractériser par :

1. Déversoir : **Seuil vanné (05 vannes secteur)**
2. Longueur : **242 m**
3. Largeur à la base : **44m**
4. Largeur de la crête : **6,50m**
5. Hauteur depuis la fondation : **74,2 m**
6. Début et fin des travaux de construction : **1926-1945**
7. Année mise en eau : **1945-1974**
8. Capacité initiale : **18 Hm³** levé bathymétrique GEOID (2003)
9. Année de la surélévation : **1970-1974**



Fig 8 : Le lac du barrage de Zardezas (Toumi, 04/05/2016)

III.1.2 Caractéristiques de la retenue

Elle est caractérisée par :

1. Capacité avant surélévation : 15 Hm³
2. Capacité après surélévation : 31 Hm³ (1974)
3. Capacité dernier levé bathymétrique 2006 : 16,863 Hm³ ALDYPH
4. Quantité draguée de 1993 à 2006 : 10 Hm³
5. Apport moyen annuel : 50 Hm³
6. Précipitation moyenne annuelle : 650 mm
7. Envasement annuel : 0,4 /0,5 Hm³
8. Volume régularisé : 16 Hm³
9. Cote retenue normale : 197,00
10. Surface du plan d'eau à la RN 197.00 : 188 Ha
11. Cote PHE (plus hautes d'eaux): 199,00
12. Surface du bassin versant : 322 Km²



Figure 9 : la digue du barrage de Zardezas (google Earth- juillet 2023)



Figure 10 : Photo satellite du barrage de Zardezas (A. TOUMI, 2017)

III.2 Caractéristiques hydrographiques du bassin de Zardezas

La topographie contrastée, l'agressivité du climat et la lithologie tendre (marnes et argiles) ont permis la formation d'un réseau hydrographique très dense.

Le bassin versant est drainé par deux principaux cours d'eaux, leur point de jonction forme l'Oued de Saf-Saf sur lequel s'implante le barrage de Zardezas, ces cours d'eaux sont :

- l'Oued Khemakhem qui draine la partie Est.
- l'Oued Bou-Adjeb qui draine la partie Ouest étant de plus grande surface.

Et à moindre importance

- l'Oued Khorfane qui draine la partie Sud, et qui se jette dans l'oued Bou-Adjeb

La disposition du réseau hydrographique est liée en grande partie à l'évolution des phénomènes structuraux qui ont affecté la région au cours des temps géologiques. Le chevelu hydrographique suit pratiquement les accidents importants qui ont affecté les formations carbonatées du Jurassique et se modifie avec l'évolution de la tectonique. Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : la densité de drainage (Dd), le rapport de confluence (Rc) et le rapport des longueurs (Rl). (*Assaous, Y., Kemmache, R., & Abdi, I. E. 2021*).

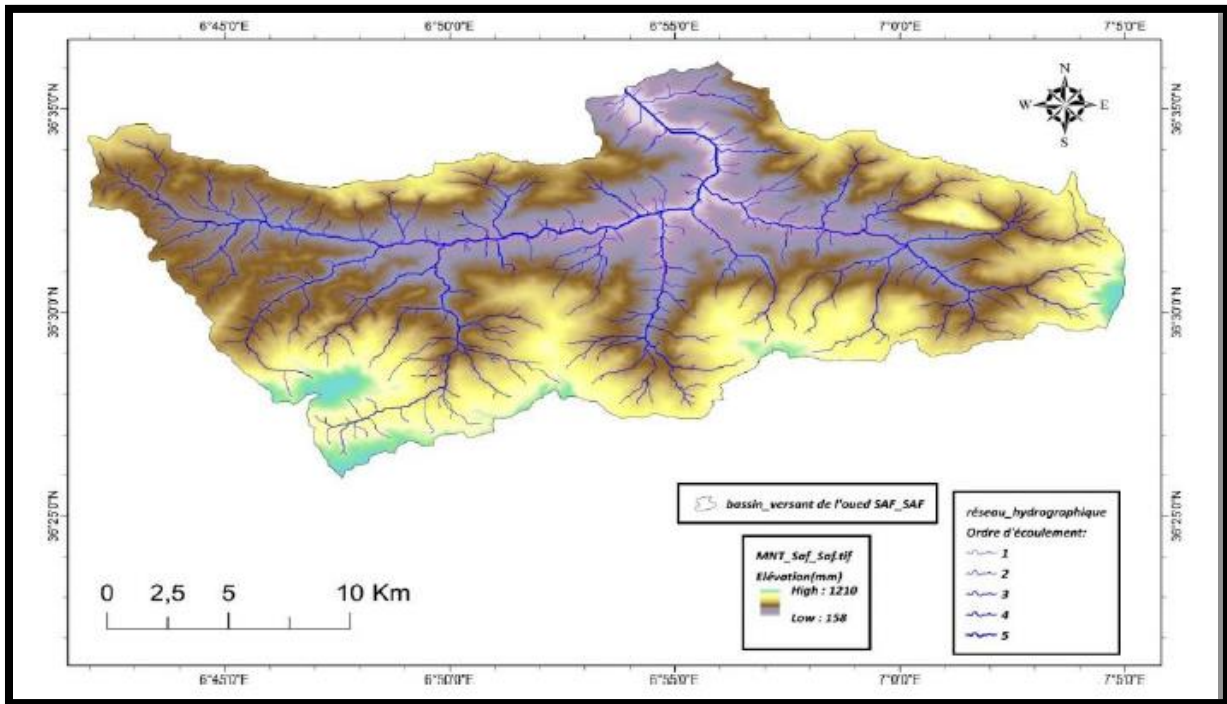


Figure 11 : Carte du réseau hydrographique du bassin de Zardezas

III.2.1 Densité de drainage Dd

Elle est déterminée comme étant le rapport entre la longueur totale des cours d'eau de tout ordre Lx sur la surface du bassin versant S.

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{S} \quad (8)$$

D_d : Densité de drainage en (km/km²) ;

l_i : Somme des longueurs de tous les thalwegs y compris le thalweg principal ;

S : Superficie du bassin versant.

$$D_d = 3,39 \text{ Km/Km}^2$$

L'interaction du climat, lithologie et relief ont généré un chevelu hydrographique particulièrement dense, cela est traduit par une densité de drainage Dd assez élevée (3,93 km / km²) (ANRH. Constantine).

III.2.2 Temps de concentration

C'est le temps mis par la première goutte de pluie tombée sur le point le plus éloigné du bassin pour atteindre l'exutoire. Ce paramètre ; exprimé en heures (h) dans l'équation ci-dessous ; peut être estimé par la formule de Giandotti, applicable pour les bassins étendus à pentes plus ou moins uniformes :

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5 L_p}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (9)$$

S: superficie du bassin versant

L_p: longueur du talweg principal (km).

H_{moy} et **H_{min}** sont, respectivement, les altitudes moyenne et minimale du bassin (m).

On remarque que le (Tc) est d'autant plus élevé que l'allongement du bassin est marqué.

La lithologie et le couvert végétal influe également sur le (Tc) en jouant le rôle d'entrave empêchant l'eau de s'écouler.

$$Tc = 6,56 \text{ h}$$

III.2.3 Le couvert végétal

La régression de la forêt du bassin, particulièrement dans sa partie Nord, a conduit déjà au cours du siècle précédent à une perturbation profonde de toute la morphogénèse de la zone. Les bouleversements observés ont provoqué des transformations latentes, mais inexorables du milieu, aggravant de la sorte les déséquilibres déjà bien entamés dans les terroirs (H. Amirèche 2009).

Il est clair que le couvert végétal est efficace pour réduire le ruissellement. La couverture du sol, plus particulièrement celle assurée par la strate herbacée et les résidus végétaux, constitue la protection la plus efficace du sol. Elle intervient vis à vis du sol par :

- l'interception nette : une partie de la pluie qui tombe sur la végétation est directement reprise par l'évaporation, elle ne participe alors, ni à l'infiltration, ni au ruissellement.

- la dissipation de l'énergie cinétique : une partie de la pluie interceptée par le feuillage continue sa course jusqu'au sol. L'énergie cinétique des gouttes s'en trouve alors modifiée.

(A. Samiha 2015).

Le couvert végétal est d'autant plus efficace qu'il amortit considérablement le rebondissement de la terre lors de l'impact des gouttes d'eau sur le sol, qu'il recouvre une forte proportion du terrain au moment d'une forte précipitation, qu'il ralentit le ruissellement et qu'il participe directement à la pédogénèse. La couverture végétale couvre 60% du bassin versant, à part quelques taches de forêts bien dégradées. Nous constatons la prédominance du maraîchage et des cultures céréalières dans les parties sud et sud-est de notre bassin versant. Le couvert végétal est pratiquement inexistant sur les zones marneuses et généralement peu dense sur les reliefs. (B. Remini et J. M. Avenard)

III.3 Caractères physiques et morphométriques du bassin de Zardezas

Les différents paramètres morphométriques du bassin notamment, la forme, les altitudes caractéristiques, la pente et le relief, interviennent d'une façon directe dans les modalités de l'écoulement, donc il convient de les préciser dès le début de toute étude.

Le bassin versant de Zardezas s'étale sur une superficie d'environ 322 Km², cette surface est délimitée par une ligne de partage des eaux de 81,5 Km, étant le périmètre du bassin versant.

III.3.1 La forme du bassin versant

La forme du bassin versant influence sur l'écoulement et sur l'allure de l'hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin versant. Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser la forme, et aussi de comparer les bassins versants entre eux, parmi ces indices celui de Gravelius qui caractérise la compacité du bassin versant. Il se définit comme le rapport du périmètre du bassin versant au périmètre du cercle ayant même surface.

$$\boxed{Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{S}}} \quad \rightarrow \quad Kc = 1,27 \quad (10)$$

Avec : P : le périmètre du bassin

S : la superficie

Suivant le résultat du Kc nous pouvons dire que le bassin versant de Zardezas est caractérisé par une forme allongée.

III.3.2 Rectangle équivalent

Selon ROCHE, le rectangle équivalent permet de comparer les bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. Le contour du bassin devient rectangle de même périmètre dont la longueur et la largeur seront :

a) Longueur du rectangle équivalent

La longueur du rectangle équivalent est donnée par la relation suivante :

$$\boxed{L = \frac{Kc*\sqrt{S}}{1,128} * 1 + \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{1,29}\right)^2} \right]} \quad \rightarrow \quad L = 30,06 \text{ Km} \quad (11)$$

b) Largeur du rectangle équivalent

La largeur du rectangle équivalent est donnée par la relation suivante :

$$\boxed{l = \frac{Kc*\sqrt{S}}{1,128} * 1 + \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{1,29}\right)^2} \right]} \quad \rightarrow \quad l = 10,71 \text{ Km} \quad (12)$$

III.4 Caractéristiques des altitudes (le relief)

L'importance des reliefs et leur articulation dans l'espace jouent un rôle essentiel dans le bilan hydrique et par conséquent dans l'aptitude aux écoulements.

L'orographie définit un gradient pluviométrique et thermique de chaque bassin est caractérisé par la répartition altitudinale de son impluvium. La zone d'étude est située dans une région caractérisée par des altitudes caractéristiques très remarquables, ou on note une altitude maximale H_{\max} égale à 1220 m, une altitude minimale H_{\min} égale à 206 m, et une altitude moyenne H_{moy} égale à 628 m. (*Abaoub, S.2015*).

III.4.1 Indice de pente globale

Cet indice permet de déduire la nature du relief en se référant à la classification de l'O.R.S.T.O.M (tableau 1.).

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (13)$$

D: La dénivelée ou bien la distance qui sépare les altitudes ayant 5% de la surface du bassin et celles de 95% ou bien la distance qui sépare les deux courbes de niveau maitresses extrêmes H5% et H95%

$$D = H_{5\%} - H_{95\%}$$

L: la longueur du rectangle équivalent ; $L = 30,06 \text{ Km}$

Alors : $I_g = 22,30 \text{ m/km}$

III.4.2 Dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique (D_s) ; est un facteur qui nous aide à comparer le type de relief de différents bassins entre eux.

Elle est exprimée en m, et elle s'obtient à partir de l'indice de pente global et la superficie du bassin versant par la relation :

$$D_s = I_g * \sqrt{S} \quad (14)$$

Ce paramètre a permis aux chercheurs de l'ORSTOM d'établir une classification du relief (Tab.1).

$$D_s = 400,28 \text{ m}$$

Tableau 1 : Classification du relief suivant l'O.R.S.T.O.M

Classe de relief	Type de relief	I_g (m/km)	D_s (m)
R1	Très faible	< 2	< 10
R2	Faible	2 – 5	10 – 25
R3	Assez faible	5 – 10	25 – 50
R4	Modéré	10 – 20	50 – 100
R5	Assez fort	20 – 50	100 – 250
R6	Fort	50 – 100	250 – 500
R7	Très fort	> 100	> 500

D'après le tableau ci-dessus la dénivelée spécifique montre que le relief est fort, cela veut dire, que la réaction du bassin versant vis-à-vis les pluies est aussi forte.

VII. Interprétation des résultats hydrographique et morphométriques

Les résultats des caractéristiques hydrographique et morphométriques, montrent que la densité de drainage est assez importante (3,39 Km/Km²), ceci est due certainement au nombre considérable de talwegs de premier ordre. Quant au temps de concentration, il semble important puisque le temps qu'a mis une goutte d'eau pour arriver du point le plus éloigné à l'exutoire est de 6,56 heures.

Ceci, explique la complication des chenaux qui traversent les différentes structures et la forme allongée du bassin versant.

Le bassin amont du Saf-Saf est bien encadré par un relief accidenté d'une altitude assez considérable (plus de 400 m), et qualifié de fort ($D_s = 400,28$ m), la dominance des formations lithologiques de faible à très faible perméabilité (51,82 %), favorise l'écoulement de surface compte tenu que la couverture végétale pérenne n'occupe que 31% de sa superficie et est en ascendance dégradation, outre l'importance des terrains de fortes pentes dépassant 12 % (68,62 %), tout cela a engendré la genèse d'un réseau hydrographique dense ($D_d = 3,39$ km / km²) et surtout d'une grande capacité de mobilisation des eaux ruisselées ($T_c = 6,56$ h).

Chapitre III

HIDROCLIMATOLOGIE

DU

BASSIN VERSANT

I. Introduction

Les conditions climatiques jouent un rôle primordial dans le comportement hydrologique des cours d'eau. Les précipitations surtout liquides, le vent, la température, l'humidité, l'évaporation et d'autres, constituent les facteurs essentiels intervenant au climat du bassin versant par :

- Leurs hauteurs annuelles qui déterminent l'abondance fluviale ;
- Leurs répartitions mensuelles et saisonnières et les totaux journaliers et surtout les averses génératrices provoquant les crues.

L'étude des possibilités de la maîtrise des ressources hydriques dans le bassin est extrêmement liée à ces phénomènes qui régissent les écoulements. Pour cela, il est très utile de faire l'approche hydro climatique.

II. Équipement hydro-pluviométrique du bassin

Faisant partie de la région de l'extrême Nord-Est algérien, et du grand bassin de Saf-Saf, le bassin versant de Zerdazas est caractérisé par un climat méditerranéen marqué par deux saisons distinctes :

La saison humide, relativement fraîche allant du mois d'Octobre jusqu'au mois Mars, et la saison sèche, plus chaude et sèche et qui s'étale du mois d'Avril jusqu'au mois de Septembre. Les contrastes géomorphologiques font que les facteurs hydroclimatologiques se répartissent de façon plus ou moins irrégulière dans le temps et dans l'espace.

Le bassin versant de Zerdazas est équipé de trois stations dont deux pluviométriques et une hydrométrique, sont réparties dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Caractérisation des stations pluviométriques et hydrométriques (ANRH)

Poste pluviométrique	Code	X(Km)	Y(Km)	Z(Km)	Période d'observation	Période
Khemakhem (Auto)	030901	878,472	370,3	635,88	1970-2014	SP
Khemakhem (Auto)	030901	878,472	370,3	635,88	1970-2014	SH
Zerdazas (Bge)	030903	875,3	374,6	671,06	1970-2014	SP

NB : SP : station pluviométrique ; **SH :** station hydrométrique

III. Caractéristiques climatologiques

III.1 La précipitation

La pluie est un facteur climatique très important qui conditionne l'écoulement saisonnier et influence directement le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes aquifères. La région d'étude est considérée parmi les régions moyennement arrosées avec une moyenne annuelle de l'ordre de 700 mm. Elles sont relativement importantes, variables et irrégulières d'une année à une autre.

III.1.1 Pluies moyennes mensuelles

Le mois le plus pluvieux est le mois de décembre. Sa pluviométrie peut atteindre parfois les 123 mm.

Tableau 3 : Précipitations moyennes mensuelles

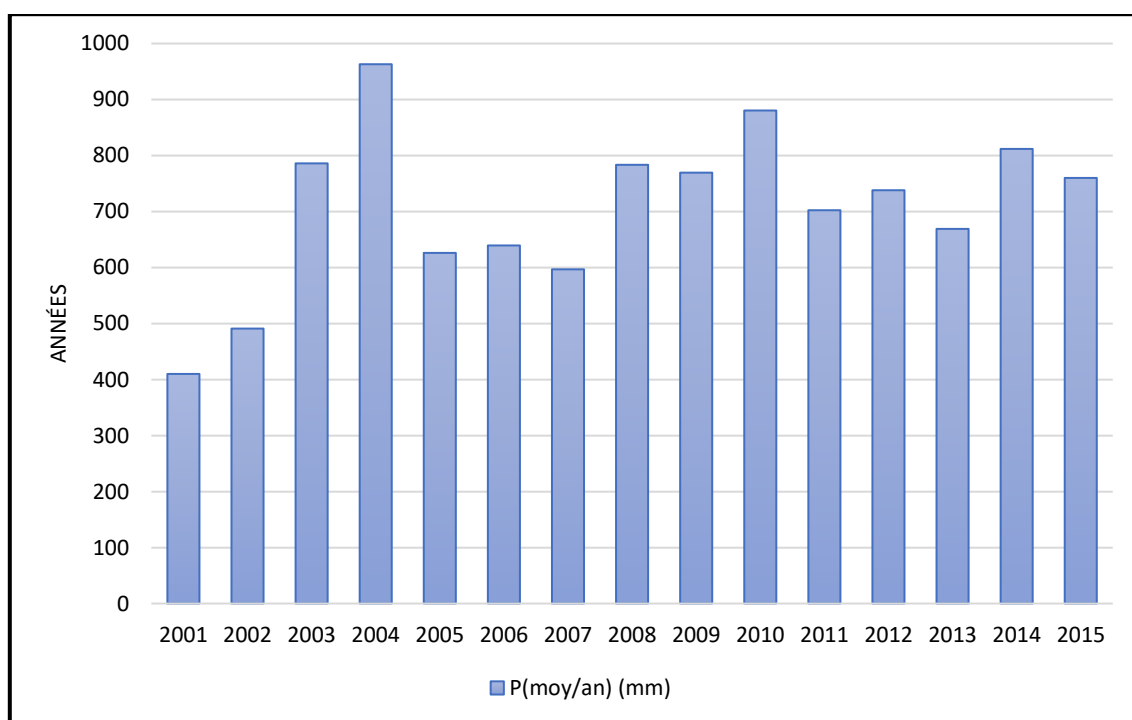
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Août	Tot
P(mm)	32	64	91	123	104	87	82	57	57	14	4	9	724

III.1.2 Pluies moyennes annuelles

Elles sont assez importantes, elles varient entre 410 mm et 963 mm. La moyenne annuelle de la série de 15 ans d'observation (2001-2015) égale 708.44 mm.

Tableau 4 : variation de la Pluies moyenne annuelles (2001-2015).

Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
P(mm)	410	491	786	963	626.1	639.4	596.8	783.4	769.4	880.4	702.3	738	669	811.8	760

**Figure 12 : Représentation graphique des moyennes des Pluies annuelles (2001-2015)**

III.2 La température

Dans le bassin étudié, la température moyenne annuelle varie entre 18 et 19 °C.

Pour le bassin versant de Zardezas, le mois le plus froid est Janvier avec une température de (10,9 °C) comme il est montré dans le tableau et le graphe suivants, dont le mois d'Août étant le plus chaud ou la température moyenne enregistrée est de (24,7°C).

L'étude d'une série des 20 dernières années de la température moyenne mensuelle nous a donné les résultats mentionner sur le tableau et la figure ci-dessous

Tableau 5 : variation des Température moyenne mensuelles des 20 dernières années

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Août	Moy
T °C	22.6	18.8	14.8	11.7	10.9	11.6	12.3	14.4	17.7	21.1	24.1	24.7	17.1

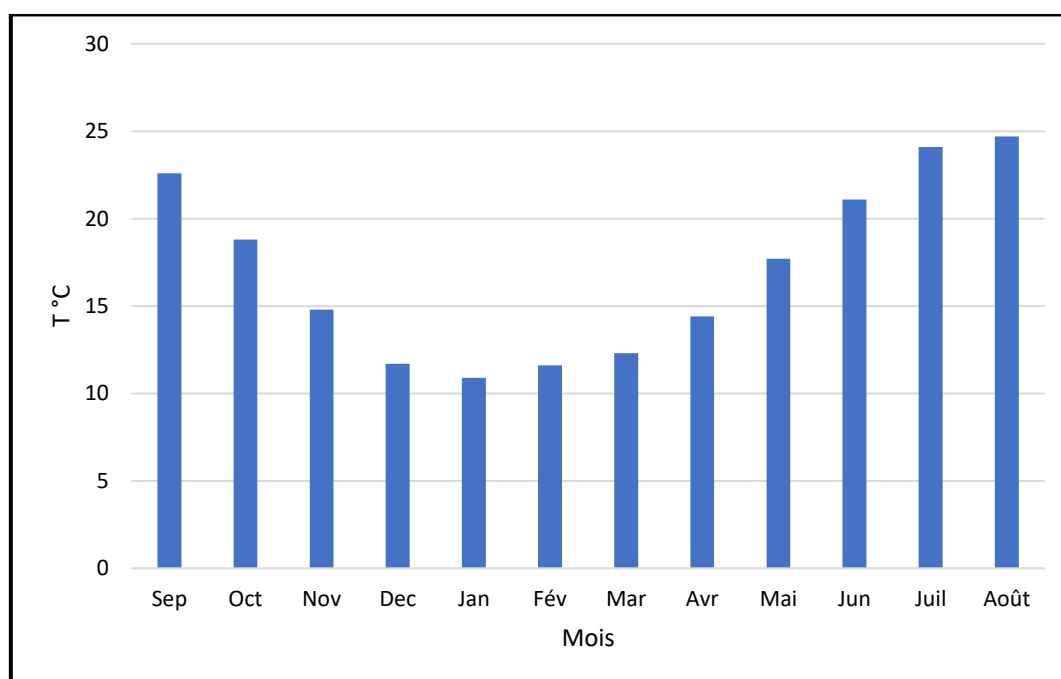


Figure 13 : moyenne des Température mensuelles des 20 dernières années

Le tableau ci-après récapitule les variations mensuelles et annuelles de la température dans le bassin de Zardezas, série de la station de Zardezas (1987/2012). In (F. Khalfaoui 2013)

Tableau. 6 : moyennes des Températures mensuelles (1987/2012).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Août	Moy
Min	18.8	16.7	11.9	8.9	8.2	8.2	9.1	12.2	14.6	17.8	21.4	21.7	14.1
Moy	24.5	21.6	16.2	12.8	12.2	11.8	14.3	17.4	21.0	24.9	28.9	28.7	19.5
Max	30.1	26.7	20.7	17.0	16.9	15.9	19.1	22.2	27.0	31.7	36.2	36.0	25.0

Source. Stations de Zardézas.2013

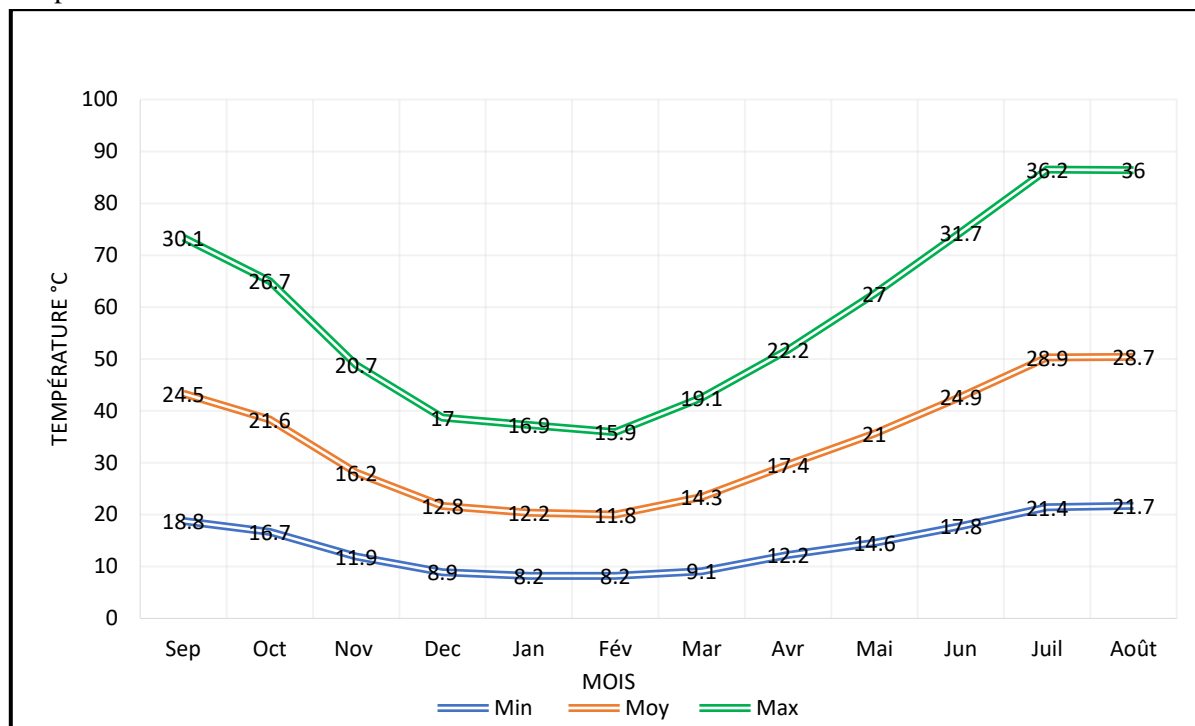


Figure 14 : Variations des températures moyennes mensuelles à la station de Zardezas (1987/2012). (F. Khalfaoui 2013)

III.3 Régime climatique

Un régime climatique est un modèle ou une description des conditions météorologiques et climatiques typiques qui prévalent dans une région donnée sur une période de temps spécifique. Il est généralement basé sur des données historiques de température, de précipitations, de vent et d'autres variables météorologiques sur une longue période, souvent plusieurs décennies.

Les régimes climatiques sont utiles pour comprendre et caractériser le climat d'une région donnée. Ils permettent aux scientifiques, aux planificateurs urbains, aux agriculteurs et à d'autres acteurs de prendre des décisions éclairées sur la gestion des ressources naturelles, tel que l'eau, l'urbanisme, l'agriculture et d'autres aspects de la vie quotidienne qui sont influencés par le climat.

Il existe de nombreux types de régimes climatiques dans le monde, tels que les climats équatoriaux, tropicaux, désertiques, méditerranéens, tempérés, subarctiques, etc. Chacun de ces régimes climatiques a des caractéristiques spécifiques en ce qui concerne les températures moyennes, les précipitations, les saisons et d'autres paramètres climatiques.

Il est important de noter que les régimes climatiques sont susceptibles de changer avec le temps en raison de facteurs tels que le changement climatique provoqué par les activités humaines. Par conséquent, l'étude des régimes climatiques est un domaine en constante évolution pour mieux comprendre et anticiper les modifications climatiques futures.

Afin de déterminer le régime climatique de la région étudiée nous avons utilisé une méthode dite la méthode du diagramme ombrothermique élaboré par Gaussen et Bagnols, et qui se base sur les données des moyennes de précipitations et de températures enregistrées durant la même période et dans la même région, avec $(P \text{ (mm)} \leq 2T \text{ } ^\circ\text{C})$.

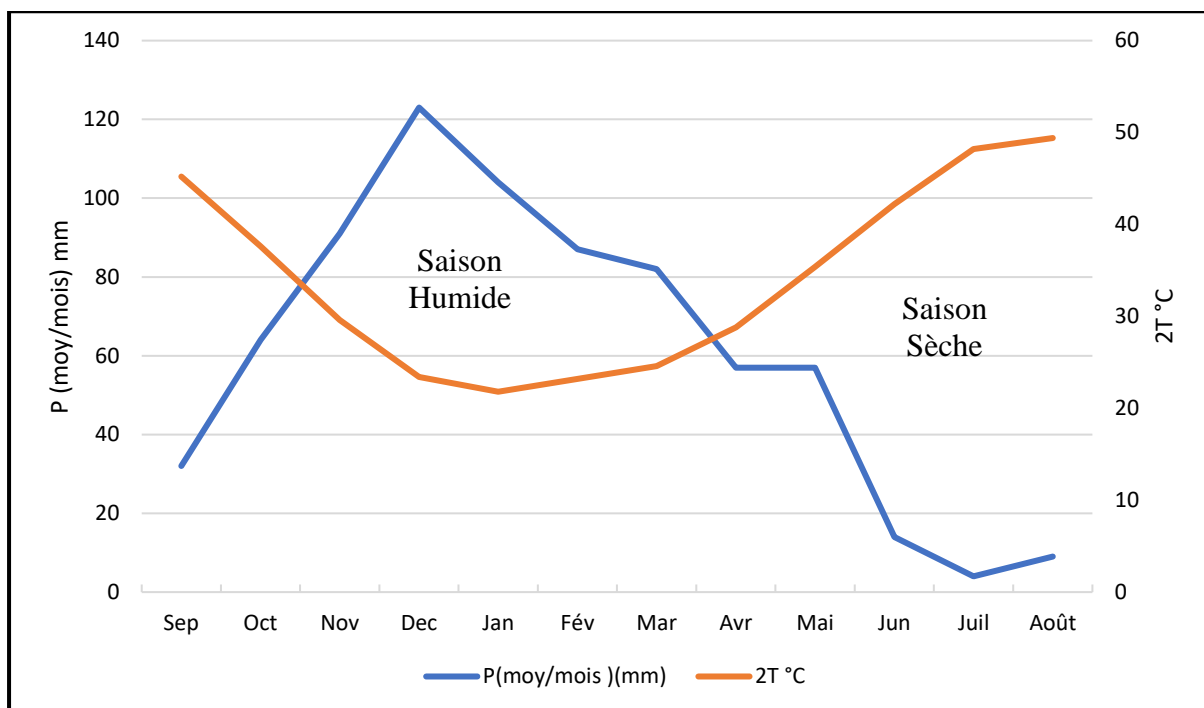


Figure 15 : Diagramme Ombro-thermique de la station du barrage de Zardezas.

Le diagramme montre que le bassin versant est caractérisé par deux périodes, une humide allant du début de Novembre jusqu'au mi-Avril, et une sèche demeurant de mi-Avril jusqu'au fin d'Octobre.

Ce régime climatique caractérise en générale le Nord algérien, où règne le régime méditerranéen, ou on peut distinguer deux périodes, une humide et froide, et l'autre sèche et chaude.

IV. Caractéristiques hydrologiques

IV.1 Les écoulements

L'étude du phénomène de l'écoulement et des variations de ses débits à l'échelle journalière, mensuelle, ou même annuelles est une étape très importante dans toute étude hydrologique, afin d'établir les caractéristiques de la dynamique fluviales et sédimentaires dans les bassins versants.

Alors pour mieux comprendre la répartition et le bilan des eaux dans le bassin versant, il s'avère indispensable d'étudier les fluctuations des débits des cours d'eaux.

D'une superficie totale de 322 Km², le bassin versant de Zardezas est formellement montagneux ; ses écoulements sont contrôlés dans leur totalité par le barrage même et la station hydrométrique de Khémakhem.

Les mesures effectuées à cette station jouent un rôle essentiel dans l'estimation de l'écoulement.

IV.2 Débit moyens annuels

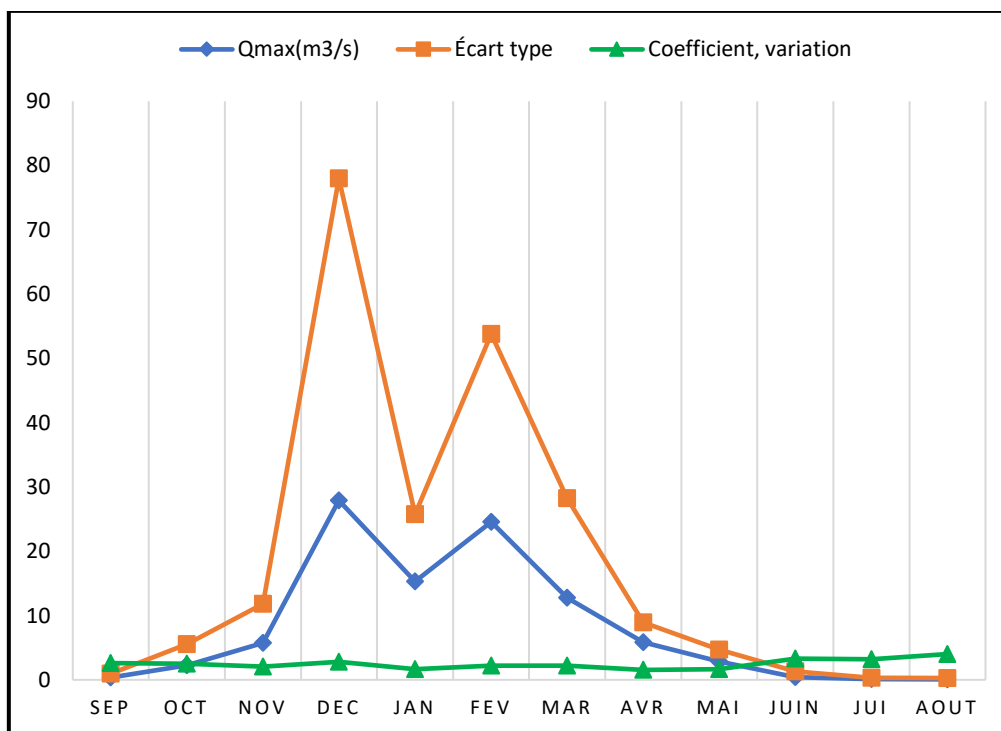
L'écoulement moyen annuel ou l'abondance annuelle est une notion fondamentale en hydrologie. C'est le volume d'eau écoulé en 365 jours à la sortie d'un bassin. Le module brut ou absolu est généralement exprimé en m³/s et le module spécifique se traduit en (l/s⁻¹/km⁻²).

Les données hydrométriques de la station de Khemakhem disposent d'une série de 28 ans d'observation.

Tableau 7: Variation interannuelle de l'écoulement à la station hydrométrique de Khemakhem

Station hydrométrique	Paramètres de variation	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout
KHMAKHEM	Q _{max} (m ³ /s)	0,38	2,23	5,74	27,90	15,32	24,56	12,74	5,82	2,85	0,40	0,09	0,07
	Écart type	0,98	5,55	11,81	77,98	25,78	53,81	28,26	8,95	4,70	1,32	0,30	0,28
	Coefficient, variation	2,58	2,48	2,06	2,79	1,68	2,19	2,22	1,54	1,65	3,28	3,22	4,01

Pour étudier la variabilité de l'écoulement d'un cours d'eau, il est nécessaire de se référer aux quelques paramètres statistiques, dans ce cas le plus couramment utilisé est l'écart-type ou son dérivé le coefficient de variation.



Figures 16 : Variation interannuelle de l'écoulement de station hydrométrique

IV.3 Variations des débits annuels moyens bruts

L'analyse de la série des données interannuelle des écoulements à la station hydrométrique de Khemakhem, montre que le débit moyen annuel est de l'ordre de $0,98 \text{ m}^3/\text{s}$, avec une aire de réception de 322 km^2 , un débit relativement faible mais qui s'explique par la présence du barrage du Zardezas en aval ainsi que le caractère des formations géologiques en amont.

IV.4 Variations des débits annuels moyens spécifiques

Afin de mieux cerner la variation de l'écoulement dans le sous bassin, nous utiliserons les débits spécifiques, varie d'une part en fonction de la distribution des précipitations et d'autre part en fonction des caractéristiques physiographiques du bassin, à savoir la lithologie, le couvert végétal.

Le bassin de Zardezas, s'étend sur 322 km^2 , reçoit moins de précipitations, son débit spécifique est de $3,05 \text{ l/s/km}^2$ correspondant à une lame d'eau écoulée de $95,31 \text{ mm}$.

Ces valeurs relativement fortes du débit spécifique au niveau du bassin versant, sont dues à la taille et la lithologie du bassin.

IV.5. Variabilité saisonnière et mensuelle de l'écoulement

L'analyse des débits moyens mensuels permet de comprendre les régimes des cours d'eau et leurs variations inter annuelles ou inter saisonnières.

La précipitation moyenne annuelle et l'infiltration au niveau de la station de KHMAKHEM sont fortes, le coefficient d'écoulement est de l'ordre de $C_e = 14,99 \%$. Ces résultats peuvent être expliqués par la nature perméable du bassin et les hautes températures favorisant l'évapotranspiration.

La lame d'eau moyenne écoulée (L_r) est estimée à $95,31 \text{ mm}$, elle est nettement moyenne par rapport à la hauteur pluviométrique moyenne du sous bassin, la tranche d'eau annuelle moyenne précipitée (P) est estimée à $635,88 \text{ mm}$.

D'une manière générale, le déficit annuel moyen de l'écoulement augmente avec l'accroissement du total pluviométrique moyen annuel

IV.6 Les crues

Les débits extrêmes que sont les phénomènes de crues et d'étiages ne peuvent être cernés que dans leur succession chronologique, allant de quelques heures à plusieurs jours.

L'étude des crues permet de mettre en évidence la réaction du bassin versant pendant un pas de temps réduit à une averse ou séquence pluvieuse donnée. Cette réaction ou réponse du bassin, fonction des caractères propres des précipitations (hauteur, intensité et durée) est déterminée par la combinaison complexe de divers éléments caractérisant l'organisation

fluviale : état de saturation des sols, importance des pentes, densité de drainage, taux de la couverture végétale, forme du bassin etc.... (Mébarki, 1986).

Le bassin versant d'Oued Saf-Saf amont (Zerdazas) est caractérisé par le nombre important des crues qui évoluent dans l'espace et dans le temps, elles sont très violentes et soudaines et de courte durée, puisque provenant soit d'orages locaux en Été, soit des dépressions sahariennes au printemps et plus souvent encore en Automne.

Parmi les crues généralisées au niveau du bassin on peut distinguer des crues de saison froide et d'autres de saison chaude :

Les crues de la saison froide se manifestent généralement entre Novembre et Mars, par contre ceux de la saison chaude apparaissent entre Avril et Octobre.

IV.7 Exemples des crues

A. La crue de 03 Février 1984

Les averses génératrices de ces crues ont un caractère à la fois durable et bref, le débit de pointe enregistré le 03 Février a atteint un débit de 745,08 m³/s, soit un débit spécifique de l'ordre de 2313,91 l/s/km² avec un volume total enregistré atteint 25,96* 10⁶ m³ et un coefficient (e) de 41,52. La hauteur d'eau s'est élevée à 576 cm, ce qui a provoqué des débordements considérables dans le lit majeur.

B. La crue du 25 Mai 1992

On a enregistré un débit instantané égal à 78,30 m³/s soit un débit spécifique de l'ordre de 243,17 l/s/km² et un volume total de 30,38* 10⁶ m³.

Cette crue est considérée comme une des plus fortes à oued Saf-Saf amont pendant la saison chaude.

On conclure que les crues n'affectent pas avec la même puissance.

Après un examen de toutes les crues observées, les crues ont été classées en deux types :

- Crue complexe, résultant d'une averse complexe à plusieurs pics.
- Crue à pointe unique, provoquée en règle générale par une averse de courte durée et de forte intensité.

Les crues complexes parviennent généralement en Hivers et au Printemps. Elles sont générées par des averses longues, régulières et continues, caractérisées par des intensités faibles ou moyennes.

Elles sont en outre généralisées dans l'espace et se produisent sur des sols saturés et imperméables. Le temps de base est alors très long, dépassant les 24 heures.

Les crues à pointe unique, correspondant à des crues d'Automne, sont provoquées par des averses de début de saison, de type orageux, de courte durée et de fortes intensités.

Ces averses sont généralement localisées dans l'espace et se produisent sur les sols secs, impliquant un temps de réponse long et dépassant huit heures. Le temps de montée de l'hydrogramme est très court, tandis que le temps de décrue est plus prolongé.

V. Perte de capacité de stockage par envasement

V.1 Introduction

L'Algérie est un pays aride, et il ne dispose que de 110 barrages en exploitation, leurs capacités totales de rétention sont de 4,5 Milliards de m³ et permettant de régulariser un volume annuel de 2 Milliards de m³ utilisées pour l'A.E. P, l'industrie et l'irrigation. Or du fait de l'érosion assez sensible (pluie de courte durée, de forte intensité, absence du couvert végétal et relief assez jeune ...), l'Algérie perd un volume estimé à 20 millions de m³ annuellement, par le dépôt des sédiments dans les cuvettes des barrages.

Plus que les problèmes de la sécheresse, la pénurie, la perte et le gaspillage de l'eau, l'Algérie se trouve face à un autre problème majeur et grave, c'est le phénomène d'envasement des réservoirs de barrages qui va réduire ses capacités de stockage, et à fur et à mesure il peut détruire l'édifice et le rendre inutile.

La réduction de la capacité de la retenue et l'obturation des organes de vidange sont des menaces qui pèsent lourdement sur la rentabilité des infrastructures hydrotechniques quand ce n'est pas sur la sécurité même de l'ouvrage.

V.2 Envasement du barrage de Zardezas

Le barrage de Zardezas a atteint une vitesse d'envasement de 0,4 million de m³/an entre 2003 et 2006 (*Toumi & Remini, 2020*), sachant que le phénomène en lui-même a commencé bien avant, d'où la nécessité de dragage.

Après 20 ans du premier levé bathymétrique et pour la même cote du lac, on enregistre une diminution à chaque levé bathymétrique, du volume d'eau stocké dans la retenue du barrage de Zardezas, cette perte est due à la quantité de vase déposée dans cette retenue.

En effet, la faible vitesse de sédimentation de 0,1247 Hm³/an est enregistrée entre 1986 et 2003 du fait que la cuvette a subi un très fort dévasement durant cette période, alors que la forte vitesse d'envasement 0,42 Hm³/an, constatée entre l'an 2003 et l'an 2006 est due aux quantités faibles de sédiments extraites par dévasement de la retenue d'une part et d'autre, ce qui est possible, à la grandeur de quantité de vase arrivée à la cuvette du barrage.

Le dévasement, par dragage, effectué au barrage des Zardezas a prolongé sa durée de vie, il a permis également à cet ouvrage de continuer à jouer une grande part de ses rôles dans la région où il est inauguré. Sans parler du coût du dévasement par dragage au barrage de Zardezas et sans cette action curative sa capacité de stockage serait de 3 Hm³ au lieu de 32 Hm³

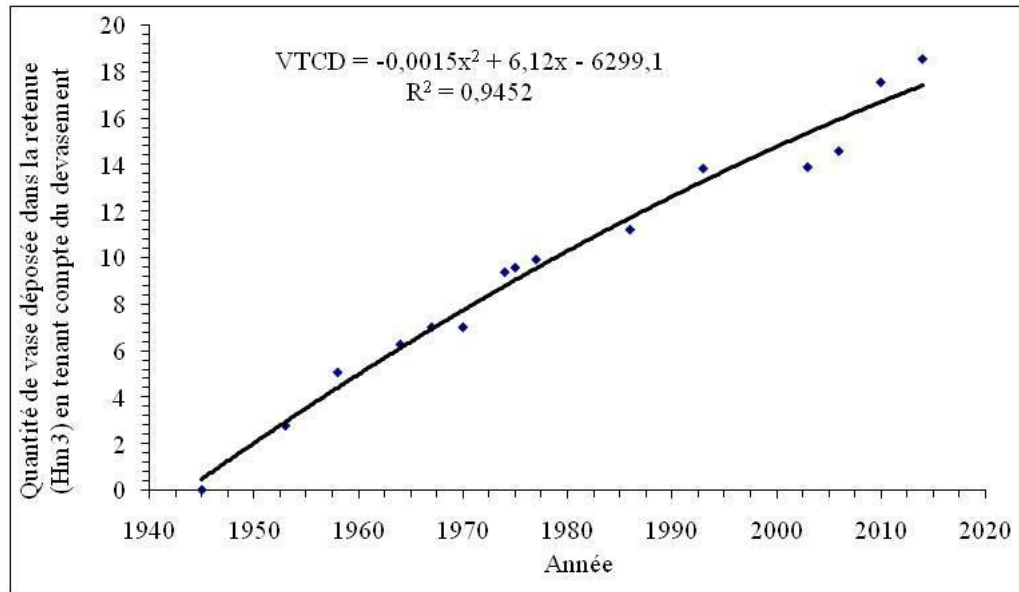


Figure 17 : Quantités de sédiment déposées au cours du temps, en tenant compte du dévasement, dans la cuvette du barrage des Zardezas, (ANBT & B. Remini 2017)

La courbe représentant la quantité de sédiments déposée dans la cuvette de ce barrage est devenue plongeante à cause des quantités de vase enlevées par dragage. Donc le dévasement effectué à cette cuvette à prolonger la durée de vie de cette infrastructure mais il est insuffisant du fait que sa capacité de stockage persiste à diminuer.

Chapitre IV

RÉSULTATS

ET

DISCUSSION

I. Problématique d'envasement des barrages en Algérie

I.1 Généralité

Le développement socioéconomique du pays exige la mobilisation de plus en plus important de nos ressources en eau. Ces ressources sont évaluées à plus de 14,2 Milliards de m³, dont près de 90% sont des eaux superficielles.

Cette mobilisation nécessite la réalisation de nombreux barrages et retenues pour créer des capacités de régularisation.

Or, du fait de l'érosion assez sensible de nos bassins (pluies courtes et de forte intensité, absence de couvert végétal, reliefs assez jeunes, ruissellement torrentiel...), ces capacités sont imputées annuellement d'un volume important, comblé par les sédiments. (*A.Chadi & T.Hadji*)

Les barrages en Algérie sont confrontés à des problèmes hydrauliques tels que l'évaporation intense, les fuites d'eau et l'envasement.

Le problème le plus grave de tous les problèmes que rencontrent les réservoirs de barrages est l'envasement. Cependant, si le phénomène n'est pas maîtrisé aux dimensions du bassin versant et de la digue, il aggrave rapidement l'état initial de la cuvette de l'ouvrage et peut même renverser les volumes initiaux de la retenue où le volume mort devient utile est inversement.

Les barrages algériens sont également exposés au problème d'envasement. En effet, les barrages disséminés à travers le pays reçoivent annuellement plus de 50 millions de m³ de vase (*ANBT*).

À titre d'exemple, le barrage de k'sob à M'sila est un ouvrage construit en 1939 pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation du périmètre du k'sob, l'ouvrage avait une capacité initiale de 29,5 millions de m³ cependant, l'effet d'érosion a envahi la cuvette avec un taux d'envasement atteint 0,7 Hm³/an rendant la capacité de rétention du barrage seulement 11,5 millions de m³, d'après le levé de 2014 fait par l'ANBT, malgré sa hauteur de 32 m au-dessus du lit de l'oued.

Sachant qu'au milieu des années soixante-dix (70) la capacité a été réduite à moins de 4 millions de m³ sous l'effet de la vase, ce qui ne permettait plus de bénéficier des apports liquides importants (50 millions de m³/an) et alors ne plus être capable de satisfaire les besoins en eau d'irrigation. (*A.Chadi & T.Hadji*)

I.2 Aperçu générale sur le barrage de Zardezas

La région où se situe le barrage lui contribué le caractère torrentiel du régime de ruissellement, ce qui mène à la naissance des crues de courte durée mais très violentes. Ces caractéristiques favorisent le transport d'une importante quantité de matériaux solides

provenant des versants dénudés, ce qui provoque un problème d'envasement de la retenue dans une courte durée.

Le barrage de Zardezas a subi un envasement dès ses premières années de mise en service, ce problème atteint son maximum avant 1970 ce qui oblige les responsables à programmer un projet de surélévation durant la période allant de 1971 à 1974 pour augmenter sa capacité de stockage à environ 32 Hm³. (ANBT)

Des levés bathymétriques ont été établis en 1986, 2003 et 2006, pour un suivi régulier du toit de la vase et pour l'actualisation des courbes hauteur/capacité. De 1939 jusqu'à 2005, une quantité de 19,44 Hm³ de vase s'est déposé dans la retenue, provoquant un envasement de 62 % du barrage. (Abaoub, S. 2015).

a) **Constat de l'envasement actuel du barrage de Zardezas**

Depuis la mise en eau du barrage en 1945, la charge annuelle moyenne en sédiments est de 0,5 hm³. La concentration moyenne des sédiments transportés par les eaux de l'Oued Saf-Saf amont est trop élevée.

En 2005, un constat de l'envasement de la retenue de Zardezas a indiqué que la cuvette est envasée à 70%, ce qui donne un volume de vase de plus 4,05 Hm³. (Abaoub, S. 2015).

Un quatrième levé bathymétrique réalisé en 2014 par l'ANBT montre que la capacité de rétention du barrage est seulement de 16,86 Hm³ d'où le taux d'envasement annuel est de 0,4 Hm³, sachant que la cuvette est envasée à environ 54,38 Hm³.

b) **Perte de capacité par envasement**

La synthèse des résultats des levés topo-bathymétriques, pour le niveau normal de la retenue (NNR) et des plus hautes eaux (NPHE) sont récapitulés dans le tableau 8, ci-dessous.

Tableau 8 : Volumes et surfaces aux niveaux normal et des plus hautes eaux pour les 3 levés topo-bathymétriques.

Paramètres	Levé 1986	Levé 2003	Levé 2006
Surface au NNR (Hectares)	193.4787	189.963091	187.738
Volume stocké au NNR en (m ³)	20.802.476	18.678855	17.421000
Surface au NPHE (Hectares)	205.7 000	20 258	202.058
Volume au NPHE en (m ³)	24.194.464	20.010 000	20.744 000

Après l'analyse des trois levés bathymétriques réalisés, on peut constater la diminution de la capacité de stockage à la cote normale de la retenue, l'explication qui peut être donnée est

que, malgré les travaux de dévasement qui se sont déroulés dans cette cuvette, la vitesse de sédimentation est supérieure à celle de dévasement.

Pour mettre en exergue la variation de la capacité de stockage au cours du temps, représenté la variation des volumes d'eau dans la retenue en fonction des cotes pour les trois levés bathymétriques réalisés dans la figure 17.

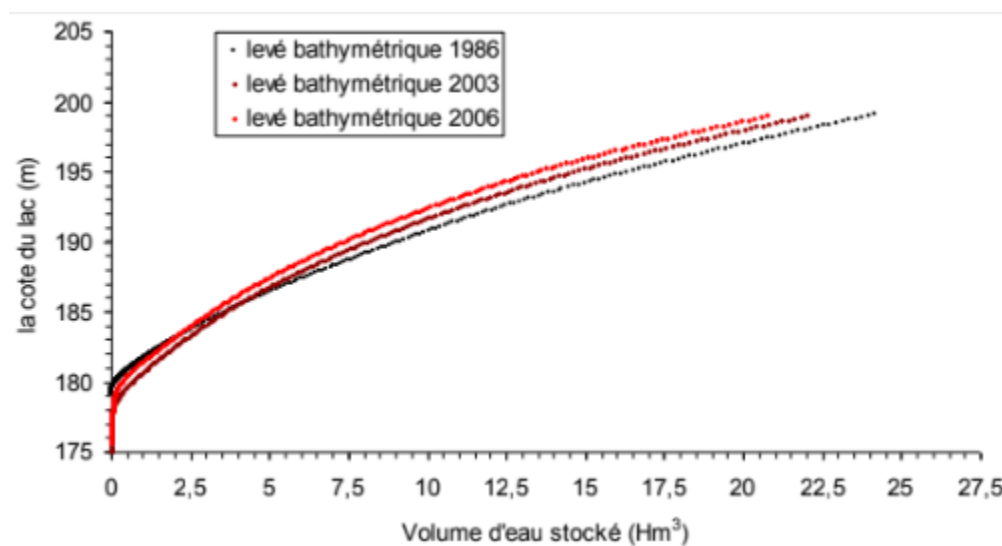


Figure 18 : Variation des volumes d'eau stockés en fonction des côtes du lac dans le barrage de Zardezas (ANBT).

La différence enregistrée entre les courbes témoigne de la modification qu'a subi la forme initiale de la cuvette du barrage de Zardezas. Ce changement de forme est dû aux matériaux transportés par l'eau et déposés dans sa cuvette. (ANBT.2006).

Le volume se trouvant entre les trois courbes est considéré comme perdu, car la vase a pris la place de l'eau.

Après 20 ans du premier levé bathymétrique et pour la même cote du lac, on enregistre une diminution à chaque levé bathymétrique, du volume d'eau stocké dans la retenue du barrage, cette perte est due à la quantité de vase déposée dans cette retenue.

En effet, une vitesse faible de sédimentation de $0,1247 \text{ Hm}^3/\text{an}$ est enregistrée entre 1986 et 2003 du fait que la cuvette a subi un très fort dévasement durant cette période, alors que la forte vitesse d'envasement, $0,42 \text{ Hm}^3/\text{an}$, constatée entre l'an 2003 et l'an 2006 est due aux quantités faibles de sédiments extraites par dévasement de la retenue d'une part et d'autre, ce qui est possible, à la grandeur de quantité de vase arrivée à la cuvette du barrage.

Sous le niveau de 184 m, on assiste à une augmentation du volume stocké par rapport à celui en 1986, cette augmentation est due au dragage stationnaire et aux vases extraites par les six vannes de dévasement.

L'analyse des plans topo-bathymétriques de l'an 2006 montre que la zone située entre la digue et 1200 m en amont du barrage est draguées jusqu'à la cote moyenne 180 m. Au-delà de 1200 m le talus abrupt montre la limite entre la zone draguée et la zone non draguée avec une pente de 24% (ANBT, 2006).

L'action curative, par dragage, effectuée dans la cuvette du barrage de Zardezas **n'arrivaient pas encore à mettre sa capacité de stockage même pas au-dessus de la moitié de son volume de stockage initial.**

En effet, malgré ces travaux, le phénomène de sédimentation persiste et on assiste chaque année à des pertes d'eau difficilement récupérables à cause de la complexité du phénomène et du coût élevé du dévasement.

La forte diminution de la capacité de stockage d'eau de la retenue du barrage de Zardezas d'un côté et de l'autre côté l'importance de cet ouvrage vis-à-vis la région où il était inauguré, a poussé l'Agence Nationale des Barrages et Transferts, au mois de septembre 1992, a entamé des opérations de dévasement par dragage de sa cuvette. (Remini, B., & Toumi, A).

I.3 Problèmes posés par l'envasement des barrages

L'envasement pose d'énormes problèmes au barrage et à son environnement. C'est ainsi que les dépôts successifs de la vase réduisent la capacité utile des barrages, le tassement et la consolidation de la boue bloquent les pertuis de vidange d'un barrage.

Un barrage envasé destiné à l'irrigation, provoque l'envasement des canaux d'irrigation. Un barrage envasé affecte fortement la qualité des eaux et accélère le phénomène d'eutrophisation. (Djillali, 2016).

1- Réduction de la capacité

La vase chasse l'eau du barrage. Avec le temps, le barrage sera complètement occupé par la boue. Le barrage est considéré comme un corps étranger au cours d'eau, il perturbe l'écoulement des eaux et la dynamique sédimentaire. En déposant petit à petit la boue au fond d'un barrage, le cours d'eau tente de retrouver sa pente initiale.

2- Blocage des vannes de fond

Les dépôts de vase durant les premières années, les pertuis de vidange sont épargnés par l'envasement. Mais dès que le volume « mort » est atteint, les vannes seront menacées par les dépôts de vase. Avec les manœuvres de vannes, un cône de vase sera dégagé près des ouvertures.

Avec le temps les vannes finiront par se colmater et devient difficile de toute manœuvres. Dans les régions arides, la gestion des vannes d'un barrage est complexe. (Figure 18).

L'ouverture des vannes en période de crues devient indispensable pour prolonger la durée de vie de l'ouvrage et évitera le dysfonctionnement de ces vannes.



Figure 19 : Blocage des vannes de fond (Remini, 2011).

3- Envasement des canaux d'irrigation

L'irrigation des terres agricoles par les eaux troubles en provenance de barrages envasés pose d'énormes problèmes pour les agriculteurs. Plusieurs kilomètres de canaux, les bassins et les siphons se trouvent envasés après chaque opération d'irrigation. Ce qui oblige les agriculteurs à effectuer périodiquement des opérations de curage (Figure II.10).



Figure 20 : Curage d'un canal par les moyens mécaniques (OPIM, 2008).

4- Impact de l'envasement sur la qualité de l'eau du barrage

Il n'y a pas de relation directe entre le limon et l'eau, mais la présence d'une grande quantité de limon dans le barrage accélère la pollution de l'eau et change sa nature.



Figure 21 : Couleur verdâtre de l'eau du barrage de SMBA.

II. Actions engagées pour la lutte contre l'envasement des barrages

II.1 Aménagement des bassins versants

La majorité des barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'année. Il est rare cependant, que l'on puisse admettre à l'issue d'une période aussi courte, l'abondance d'un aménagement hydraulique particulièrement lorsqu'il s'agit de réservoirs destinés à l'adduction en eau potable ou l'irrigation, dont les intérêts socio-économiques justifient une garantie de service illimitée.

Il importe donc, non seulement de prévoir le rythme de comblement de la retenue de façon aussi précise que possible, de manière à prendre les dispositions économiques et sociales qui s'imposent mais aussi et surtout de sauvegarder au maximum l'existence de la retenue en luttant contre ce phénomène utilisé en Algérie.

Le reboisement, la restauration des sols la formation des banquettes, la plantation de végétation à longues tiges dans les oueds sont des actions nécessaires pour lutter contre l'envasement.

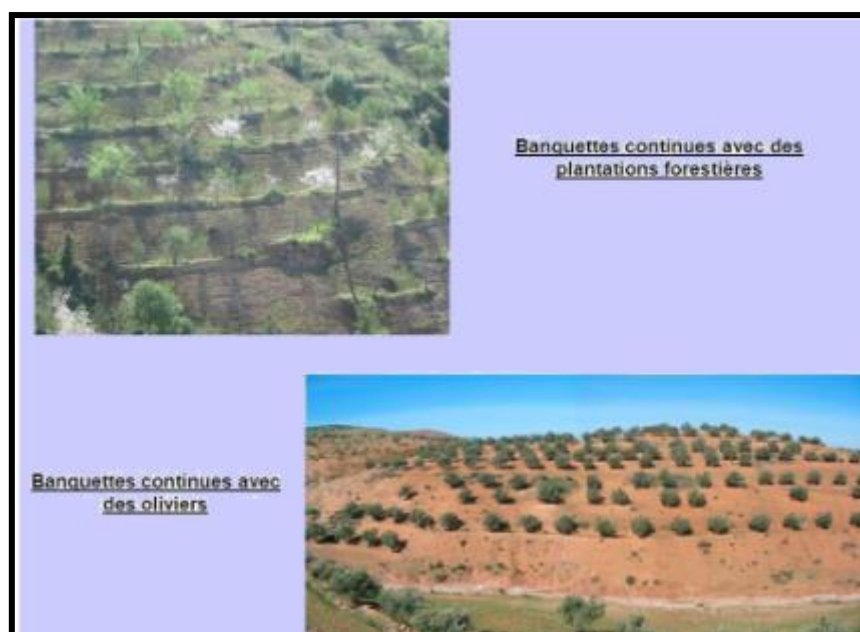


Figure 22 : Photo d'une plantation par banquettes continues

II.2 Barrages de décantation

La meilleure manière d'éviter l'envasement, c'est d'empêcher la vase d'arriver jusqu'au barrage. Se la peut se faire par la création de retenues pour la décantation des apports solides, ce qui revient à construire un autre barrage à l'amont. Cette solution n'a qu'une seule application en Algérie avec la réalisation du barrage de Bougezoul.

Ce barrage est construit essentiellement pour amortir les crues de l'oued Cheliff, il a permis de retenir depuis sa construction un volume près de 35 millions m³ de vase qui auraient pu s'ajouter aux 114 millions m³ de vase retenue actuellement dans le Ghrib sur Cheliff.

Le barrage de Bougezoul a donc réduit l'envasement du Ghrib de 24%. Son intérêt, c'est son rendement topographique puisqu'avec une digue de 13,5 m de hauteur on a pu constituer un stockage de 55 millions m³ mais il n'est pas toujours facile de trouver des conditions aussi favorables.

II.3 Surélévation des barrages

La surélévation des barrages permet d'augmenter la capacité de la retenue et donc de compenser les volumes envasés. Cette n'est toutefois pas toujours aisée à cause des limites topographiques du site et de la faisabilité technique de l'opération.

Le barrage de Zardezas avait en premier lieu une hauteur de 37m au-dessus de l'oued lui permettait d'assurer un stockage de 14,9 millions m³ cette capacité à diminuée à 7,5 millions m³ sous l'effet de l'envasement, en 1975 et 10 millions m³ en 1986.

Des travaux de surélévation ont été entrepris par l'administration pour corriger l'état du barrage, sa hauteur a été portée à presque 50 m (soit 12,7m de plus), d'où sa capacité ainsi obtenue est de 31 millions m³.

II.4 Dévasement des barrages

L'ANBT qui gère actuellement 80 grands barrages au niveau national, a mené quatre campagnes de dévasement depuis 1962, qui ont permis d'acquérir une longue expérience en matière de dragage et de faire face aux difficultés rencontrées dans la mise en dépôt de la vase et de sa récupération.

Lors de la troisième campagne de dévasement (réalisée durant la période de 2012- 2018), l'opération a permis de récupérer 16,1 millions m³ de capacité de stockage de trois barrages (Bouhanifia, Fom El Gherza et K'Sob).

Parallèlement à cette campagne, l'agence a initié depuis janvier 2021 une opération de reboisement de plus de 300 000 arbres autour des versants immédiats des bassins en vue d'éviter l'érosion des sols.

S'agissant des moyens et des équipements de dragage, l'agence avait appelée à des entreprises publiques et privées ainsi qu'à son propre matériel acquis pour cette mission.

Toutefois, l'agence a relevé que cette opération est "très couteuse" et nécessite une drague aspiratrice ayant des capacités d'aspiration allant de 2000 m³/heure à 4500m³/h qui doit être associée à un bateau de servitude assurant le ravitaillement en gasoil et autres.

Le dragage nécessite également la mobilisation d'un système de refoulement (conduite) identifié selon la nature de la vase, sachant que le coût de la vase à extraire est estimé de 160 à 170 DA /m³.



Figure 23 : la drague aspiratrice en état de fonction

Quant au dévasement mécanique de barrages asséchés, les services de l'ANBT ont expliqué que cette technique, faisant appel à l'usage de pelles et d'une importante flotte de camions, est "plus couteuse" (avec un prix de 300 à 360 DA/m³) et "risquée" par rapport au dragage classique.

L'introduction d'un engin dans une vase imbibée d'eau provoquera l'enfouissement complet de ce matériel, a averti l'agence tout en soutenant que "le recours à cette technique n'est efficace qu'au niveau des retenues où la vase est complètement asséchée et compacte".

Au niveau du barrage de Zardezas les travaux de dévasement ont été menés depuis 1992 jusqu'à 2006 par le procédé de dragage (aspiration, refoulement) et de 2006 à 2010 par celui du soutirage par les vannes de dévasement.

Selon l'ANBT, la première phase des travaux de dévasement, entamée en 1992, avait permis d'extraire 10 millions m³ de vase, avant l'arrêt des travaux qui devaient donner lieu, au titre d'une seconde phase, à l'enlèvement de 7 millions m³.

Malheureusement, celle-ci s'est limitée au dégagement de 300.000 m³ à cause d'un problème purement technique de l'entreprise qui gère l'opération.

Il est à noter que l'enlèvement de 10,3 millions m³ de vase par la technique de dragage de la cuvette a un peu augmenté la durée de vie de cet ouvrage sinon il est presque péri et sa capacité de stockage serait d'environ 3 millions m³ au lieu de 31 Hm³. (ANBT).

Actuellement le barrage se bénéficie d'un programme de dévasement mais qui se progressivement vu le coût trop élevé des travaux et l'état dégradé de la cuvette.

Pour des solutions préventives, des tentatives de reboisement et des corrections torrentielles ont été appliquées sur plusieurs bassins versants. En parallèle, des opérations de dévasement se déroulent sur plusieurs barrages.

Deux modes de dévasement peuvent être opérés au niveau d'un barrage. Il s'agit d'un dévasement périodique et d'un dévasement occasionnel.

II.4.1 Dévasement périodique

Dans ce type de dévasement on peut distinguer deux méthodes distinctes qui sont :

a) Soutirage des courants de densité

À l'arrivée des crues, l'ouverture des pertuis de vidange permet de soutirer les courants de densité qui se rapprochent du mur du barrage. Grâce à la forte concentration en particules fines, le courant de densité arrive au pied du barrage après avoir parcouru plusieurs kilomètres. La technique de soutirage des courants de densité a obtenu de très bons résultats au niveau des barrages d'Ighil Emda et d'Erraguene. Avec un rendement de 55%, la durée de vie du barrage d'Ighil Emda a triplé.

b) Évacuation de la vase par la vanne de fond

Pour éviter le blocage des vannes de fond. L'ouverture périodique des pertuis de vidange permet d'extraire les dépôts vaseux situés aux alentours des vannes. Dans ce cas, uniquement la vase située dans la zone basse qui peut être perturbée par les manœuvres des vannes. De telles manœuvres sont extrêmement nécessaires pour alléger l'ouverture des pertuis.

Un retard dans l'ouverture pourra avoir des dégâts. À titre d'exemple, la vanne de fond du barrage de l'Oued Fodda est bloquée depuis 1939. Celle du barrage de Zardezas a été bloquée durant les années 90. La vanne droite du barrage de SMBA a été colmatée suite à un fort taux d'envasement depuis une dizaine d'années. (*Remini, 1997*).

II.4.2 Dévasement occasionnel**a) Dragage du barrage**

Le dragage d'un barrage commence là où l'envasement atteint un niveau trop élevé, dépassant un taux de 50%, le dragage peut s'avérer comme ultime solution pour sauver le barrage et prolonger sa durée de vie.

Selon certains spécialistes, la récupération d'une capacité de stockage par dragage est une opération très coûteuse qui n'est pas économique pour les grandes retenues. Dans certains pays, cette opération s'impose, lorsqu'il existe peu de sites favorables à la réalisation de nouveaux barrages, comme en Algérie. Lorsque la stabilité de l'ouvrage est menacée, ou lorsque le barrage présente un intérêt économique, le dévasement devient obligatoire.

Le dragage des retenues a été pratiqué sur certains barrages algériens durant l'histoire d'hydraulique algérienne. Il s'agit des barrages de Sig, Cheurfas I, Hamiz, Ksob, Zardezas, Merdja Sidi Abed, Fergoug II, Bouhanifia, et Foug El Gherza. (*ANBT 2020*).



Figure 24 : La drague dans le barrage (ANBT)



Figure 25 : Refoulement de matériaux dragués dans le puits de la drague

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le barrage de Zardezas est l'un des anciens barrages en Algérie et à cause du taux élevé de la vase dans sa cuvette qui a dépassée 10 millions m³, provenant de son bassin versant, il a bénéficié d'un projet de surélévation de 12,7m sur l'ancienne digue, durant la période de 1971 à 1974, pour augmenter sa capacité de stockage vers 31 millions m³. (ANBT)

Jusqu'à nos jours, le problème d'envasement persiste et la capacité de stockage diminue au fur et à mesure, un autre projet a été lancé dans le barrage pour le raviver, c'est le dragage, mais comme il est très coûteux et la quantité de boues dans la cuvette est énorme, la vitesse de dévasement se progress très lentement, cela nous conduit à penser à d'autres solutions pour sécuriser les barrages, et minimiser au maximum le taux d'envasement.

Le phénomène d'envasement des retenues menace aujourd'hui presque la totalité des barrages. Parmi les problèmes que pose l'envasement des retenues de barrages, sont la réduction de la capacité, l'obturation des organes de vidange, la sécurité de l'ouvrage, l'envasement des canaux d'irrigation et la dégradation de la qualité de l'eau.

Pour réussir à protéger nos installations, il faut penser globalement pour réussir localement. On peut par exemple gérer tout le bassin versant afin de protéger le barrage, pour ce fait, il est nécessaire voire indispensable de planter des arbres afin de stabiliser les sols. Pour minimiser au maximum le taux d'envasement, les bassins versants des barrages doivent impérativement être plantés d'arbres suivant une méthode méticuleuse et raffinée qui tient compte de toutes les possibilités de stabilisation des sols.

Pour limiter au maximum l'érosion intensive et prolonger la durée de vie d'un barrage, l'application des moyens anti-érosifs les plus sérieux et les plus adaptés pour chaque lieu, à l'échelle du bassin versant, est une action à ne pas négliger.

Bien que la seconde présente des risques pour la stabilité, les pertes d'eau par évaporation et par fuites sont récupérables alors que le volume occupé par la vase est irrécupérable sauf si un coût élevé est dépensé. (A.Toumi , B. Remini)

Le barrage de Zardezas reste le seul protecteur contre les conséquences lourdes des inondations répétitives créés par Oued Saf-Saf, malgré qu'il ait perdu de son efficacité.

Redonner les rôles principaux du barrage de Zardezas par des actions préventives et curatives, quel que soit le coût, est devenu une démarche nécessaire voire même obligatoire.

Voir une eau limpide, en périodes pluvieuses, à l'entrée de la cuvette du barrage doit être le souci et la cible de tout la monde.



Références Bibliographiques

- **Abaoub, S.** (2015). *Étude du transport solide et la pollution dans le barrage de ZARDEZAS (SKIKDA.)* ; Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme Master en Hydraulique Urbaine Université Larbi Ben M'hidi– OUM EL BOUAGHI ; Algérie.
- **Assaous, Y., Kemmache, R., & Abdi, I. E.** (2021). *Modélisation pluie-débit des crues éclairs dans trois bassins versants de l'est de l'Algérie* (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- **Achite, M., Touaibia, B., & Ouillon, S.** (2006, May). *Érosion hydrique en Algérie du Nord: Ampleur, conséquences et Perspectives*. In 14th international soil conservation organization conference. water management and soil conservation in semi-arid environments. Marrakech, Morocco.
- **Abdelmadjid Chadi & Tahar Hadji** ; *érosion des sols et envasement des barrages* ; article 4 ; ministère de l'équipement.
- **ANBT** ; Agence National des Barrages et des Transferts, Constantine ; dépouillement 2014
- **Boufedji, R. R., & Khelifa, B.** (2021). *Identification et évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant d'Oued Safsaf (Nord-Est Algérien)* (Doctoral dissertation).
- **Djillali B** ; (2016) ; *Érosion et Sédimentation des barrages : perspectives et mise en œuvre de nouvelles formes d'ingénierie* ; Thèse de Doctorat ; Faculté des Sciences et de la technologie, département d'hydraulique et génie civile ; Université Mohamed khaidar de Biskra ; Algérie.
- **Fartas, F.** (2014). *Quantification du transport solide et la pollution dans le barrage de Foug El Gherza (Wilaya de Biskra)* (Doctorat dissertation, Université Oum El Bouaghi).
- **Hallaci Somia, M. L.** (2019). *Influence des rejets liquides du complexe GLI/K sur la qualité physicochimique et bactériologique des eaux de l'Oued Saf-Saf-SKIKDA.* ; Mémoire En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Sciences de la terre et de l'Univers Université 8 Mai 1945 Guelma
- **Ghezali, S.** (2019). *Modélisation de la réalisation pluie-débit par les modèles conceptuels et neuroflous.* (Application au bassin versant Zerdezas).
- **Fayçal KHELFAOUI**, (2014) . **QUALITÉ ET GESTION INTÉGRÉE DES RESSOURCES EN EAU DANS LE BASSIN VERSANT DU SAF-SAF (NORD-EST ALGERIEN)** (Doctoral dissertation, Université d'Annaba).
- **LEMZADMI Chemseddine, S. H.** (2017). *Perte de capacité de stockage en eau dans quelques barrages de l'est Algérien.*
- **Lasfar, H.** (2016). *Étude de transport solide et de la Qualité des eaux usée de barrage de Zit-Emba (W. de Skikda).*
- **MOUNYA, N.** (2020). *Contribution à l'étude des macroinvertébrés des milieux lenticques de la région de Skikda Nord-Est Algérien.*
- **REMINI, B., & TOUMI, A.** *Perte de capacité de stockage au barrage des Zardezas, Algérie.* Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique (L.G.C.H), Université 08 Mai 1945 Guelma ; Algérie / Laboratoire de Recherche d'Hydraulique Souterraine et de Surface L.A.R.HY.S.S université Mohamed Khieder, Biskra

RESUME

L'érosion hydrique provoque l'envasement des barrages, l'un des effets négatifs de ce phénomène est la diminution importante de la capacité de rétention du barrage, ce qui entraînera une dégradation de la qualité de son eau.

Au cours de ce travail, nous abordons l'étude du phénomène de transport solide et de boue dans le barrage de Zardezas au Nord-Est de l'Algérie dans la province de Skikda, basés sur la connaissance préalable d'un ensemble de données et d'informations, les résultats ont montré une baisse significative de la capacité du barrage, où elle ne dépasse pas le quart de sa capacité initiale. Ces résultats indiquent que les limons s'accumulent de plus en plus sur dans le lac du barrage et il risque d'être rempli à 100 % dans un court laps de temps, Cela peut conduire à l'abandon inévitable du barrage s'il n'y a pas de solutions viables qui pourraient même être de démolir le barrage et de reconstruire un nouveau avec de nouvelles normes techniques.

Mots clés : *Barrage – Envasement- Zardezas, Capacité, dégradation.*

ABSTRACT

Water erosion causes the siltation of dams. One of the negative effects of this phenomenon is the significant decrease in the retention capacity of the dam, which will lead to a degradation of its water quality.

During this work, we study the phenomenon of solid transport and mud in the Zardezas dam in north-eastern Algeria in the province of Skikda, based on the prior knowledge of a set of data and information, the results showed a significant decrease in the capacity of the dam, where it does not exceed a quarter of its initial capacity. These results indicate that silt accumulates increasingly on in the dam lake and it may be 100% filled in a short time, this can lead to the inevitable abandonment of the dam if there are no viable solutions that could even be to demolish the dam and rebuild a new one with new technical standards.

Keywords: *Dam, siltation, Zardezas, Capacity, degradation.*

الملخص

يشكل الإنجراف المائي توحد السدود ، ومن الآثار السلبية لهذه الظاهرة إنخفاض كبير في قدرة السدود مما سيؤدي إلى تدهور في نوعية مياه السد. نتطرق خلال هذه الأطروحة لدراسة ظاهرة النقل الصلب و التوحد في سد زردازة شمال شرق الجزائر في ولاية سكيكدة. إستنادا على المعرفة المسبقة لمجموعة من المعطيات و المعلومات حيث بينت النتائج تراجع كبير في قدرة السد ، و أنها لا تتجاوز ربع طاقته الأولية ، و تظهر هذه النتائج بأن الطمي يتراكم أكثر فاكثر في حوض السد مما يجعله يواجه خطر الإمتلاء بنسبة 100 % خلال فترة قصيرة، قد تؤدي إلى التخلي المحتوم على السد إن لم تكن هناك حلول ناجعة قد تتمثل ربما حتى في هدم السد وإعادة بناءه من جديد بمعايير تقنية جديدة.

الكلمات المفتاحية : السد، الطمي، زردازة، التوحد، القدرة