



Faculté des Sciences et Techniques
Marrakech



Département des sciences de la terre

Licence Es Sciences et Techniques

Eau et Environnement

Mémoire de fin d'études

**CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES
ET GEOMORPHOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DU N'FIS :
CONSEQUENCES SUR L'ENVASEMENT DU BARRAGE LALLA
TAKERKOUST**

Réalisé par :

El Younssi Yosra

Encadrée par :

M^r Lahcen Daoudi

Soutenu le 24 février 2011

DÉDICACE

A MON CHER PÈRE QUI A TOUJOURS ÉTÉ PRÈS DE MOI, POUR M'ÉCOUTER ET ME SOUTENIR. PUISSE CE TRAVAIL EXPRIMER LE RESPECT ET L'AMOUR QUE JE LUI PORTE.

A MA CHÈRE MÈRE QUI N'A JAMAIS ÉPARGNÉ UN EFFORT POUR M'AIDER ET M'ENCOURAGER. VEUILLEZ TROUVEZ EN CE TRAVAIL LA CONSOLATION ET LE TÉMOIN DE LA PATIENCE ET DE L'AMOUR.

A MA SŒUR YOMNA, ET MON FRÈRE MOHAMMED, À QUI JE SOUHAITE TOUT LE BONHEUR DU MONDE. VOUS AVEZ TOUJOURS ÉTÉ POUR MOI D'UNE AIDE TRÈS PRÉCIEUSE.

A TOUTE MA FAMILLE.

A TOUS MES AMIS.

A TOUS CEUX QUI ONT CONFIANCE EN MOI.

REMERCIEMENTS

*Avant de présenter mon travail, j'adresse mes remerciements les plus distingués à tous les enseignants du département de géologie de la Faculté des Sciences et Technique de Marrakech. et plus particulièrement à mon encadrant : **Mr Lahcen Daoudi** pour tous ses conseils, sa coopération et pour son précieux encadrement.*

Je remercie également Mr Abdeslam Baiddah pour son aide.

Un énorme merci à toutes les personnes de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift, la Direction Régionale des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification de Marrakech, la Direction Provinciale de L'agriculture de Marrakech et le Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et de l'Environnement de Marrakech, de m'avoir aidé dans la collecte des informations et des données.

Je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIERES :

Introduction générale.....	6
PREMIERE PARTIE : PRESENTATION GENERALE ET ANALYSES	
GEOMORPHOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU N'FIS	7
I.	SITUATION
	GEOGRAPHIQUE.....8
II.	MORPHOLOGIE ET HYSOMETRIE DU BASSIN VERSANT.....8
1.	Relief et courbe hypsométrique.....8
2.	Caractéristiques de forme..... 10
a.	Indice de compacité de Gravelius KG..... 10
b.	Rectangle équivalent..... 11
c.	Pente moyenne..... 11
d.	Temps de concentration..... 12
e.	conclusion..... 12
III.	GEOLOGIE GENERALE ET LITHOLOGIE..... 13
IV.	RESEAU HYDROGRAPHIQUE..... 14
V.	OCCUPATION DES SOLS..... 15
VI.	CARTE DE VULNERABILITE DU BASSIN VERSANT DU N'FIS... 16
VII.	REGIME PLUVIOMETRIQUE DU BASSIN VERSANT ET REGIME
	HYDROLOGIQUE DE L'OUED..... 17
1.	Régime pluviométrique du bassin versant..... 18
a.	Précipitation moyenne mensuelle : (1968-2010)..... 18
b.	Précipitation moyenne saisonnière :(1968-2010)..... 19
c.	Précipitation moyenne annuelle :(1968-2010)..... 19
2.	Régime hydrologique de l'oued.....20
a.	Variation mensuelle des débits :(1965-2009).....20
b.	Variation saisonnière des débits :(1965-2009).....20
c.	Variation annuelle des débits :(1965-2009).....21
3.	Corrélation pluie – débit.....22
VIII.	ETUDE DYNAMIQUE DES CRUES ET ANALYSE DES HYDRO-
	GRAMMES.....23
1.	Analyse des hydro-grammes des crues.....23
a.	La crue du 13 Novembre 1967.....23
b.	La crue du 17 Aout 1995.....24
c.	La crue du 28 Octobre 1999.....25
2.	Temps de base et temps de montée des crues.....26
3.	Répartition saisonnière et mensuelle des crues.....27
DEUXIEME PARTIE : CONSEQUENCES SUR L'ENVAISEMENT DU BARRAGE	
TAKERKOU.....28	
I.	ENVAISEMENT : DEFINITION ET GENERALITE.....29
1.	Définition.....29
2.	Principales méthodes d'étude de l'envasement.....29
3.	Processus de l'envasement.....35
a.	Erosion du bassin versant.....35
b.	Transport solide.....41
c.	Sédimentation et comblement des retenues.....41

II.	ENVAISEMENT DANS LES PAYS DU MAGHREB (COMPARAISON ENTRE LE MAROC , L'ALGERIE ET LA TUNISIE).....	42
III.	CAS DU BARRAGE LALLA TAKERKOUST.....	46
1.	Situation et caractéristiques générales du barrage.....	46
2.	Etude de sédimentation et estimation de la dégradation spécifique du bassin versant.....	49
3.	Comparaison avec les grands barrages du Maroc.....	50
IV.	TRAITEMENT ANTIEROSIF REALISE AU NIVEAU DU BASSIN VERSANT DU N'FIS DURANT LA PERIODE 2005-2010 ET PREVISION PAR PROJET DURANT LA PERIODE 2011-2013.....	52
	CONCLUSION GENERALE	62
	Références bibliographiques	63
	Liste des figures	64
	Liste des tableaux	66
	Liste des annexes	66
	Annexes	67

Introduction générale :

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

A l'échelle de notre pays, l'étude a démontré que :

- Sur les 20 millions d'hectares d'étendue des bassins versants en amont des barrages, plus de 5 millions d'hectares nécessitent des aménagements antiérosifs.
- Sur les 15 millions d'hectares des bassins versants du Haut Atlas, les zones à risques représentent 75% et les zones à risque importants représentent 25%.
- Sur une capacité totale de stockage de 14 milliards de m³ d'eau, 800 millions sont déjà perdus par envasement.
- Le rythme annuel d'envasement est de l'ordre de 50 millions de m³.
- Les pertes totales actualisées dues à l'érosion sont de l'ordre de 10 milliards de Dh. (plan national d'aménagement des bassins versants).

Ces chiffres renseignent sur la gravité du problème d'envasement surtout que le Maroc a consenti depuis l'indépendance un effort considérable pour la construction de barrages.

Mon étude a été effectuée dans le bassin versant N'Fis, situé à 35 km au Sud Est de Marrakech et de superficie de 170 000 ha. Elle vise à

- caractériser la région de point de vue climatique, topographique, lithologique et hydrologique,
- procéder à une quantification des pertes en sols et son impact sur la capacité de stockage d'eau du barrage Lalla Takerkoust,
- mettre en évidence les traitements antiérosifs réalisés au sein de ce bassin.

Première partie :
présentation générale et analyse
géomorphologique et hydrologique
du bassin versant du N'Fis

I. SITUATION GEOGRAPHIQUE :

le bassin versant de l'oued N'Fis est localisé entre les latitudes 30.5° et 31.2° Nord et entre les longitudes 7.55° et 8.40° Ouest. Il fait partie du Haut-Atlas occidental et il s'étend sur une superficie d'environ 1707 Km². C'est le bassin le plus étendu du Haut-Atlas du Marrakech. (fig.1)

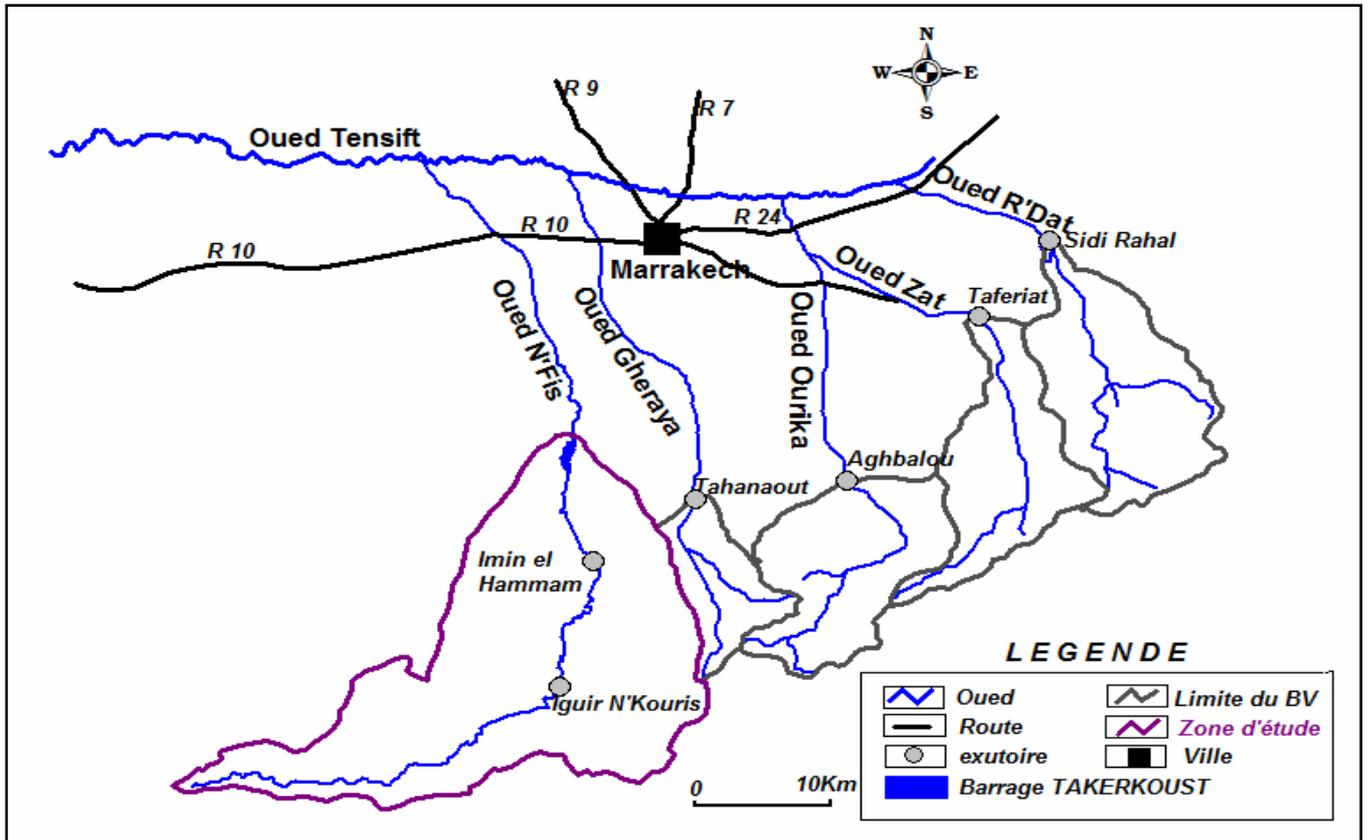


Fig.1 : Carte de situation géographique du N'Fis dans le bassin de Tensift.

Selon El Wahidi (2004), le bassin versant du N'Fis se divise en trois sections :

- Une section aval entre le Haouz et les cuvettes des Goundafa.
- Une section moyenne comprenant les cuvettes Goundafa ; correspondant plus ou moins au synclinal permo-triasique dit du N'Fis.
- Une section amont qui abandonne le synclinal et se dirige vers l'ouest à travers le massif cambrien schisteux et calcaire jusqu'au massif granitique du Tichka.

II. MORPHOLOGIE ET HYSOMETRIE DU BASSIN :

1. Relief et courbe hypsométrique :

Le relief influe directement sur la vitesse d'écoulement, sur les paramètres hydrométéorologiques (température, précipitation...), et donc sur l'intensité de l'érosion.

La figure 2 représente la carte hypsométrique du bassin de N'fis qui correspond aux différentes tranches d'altitude. Elle est décrite par un modèle numérique de terrain (MNT) téléchargé sur internet.

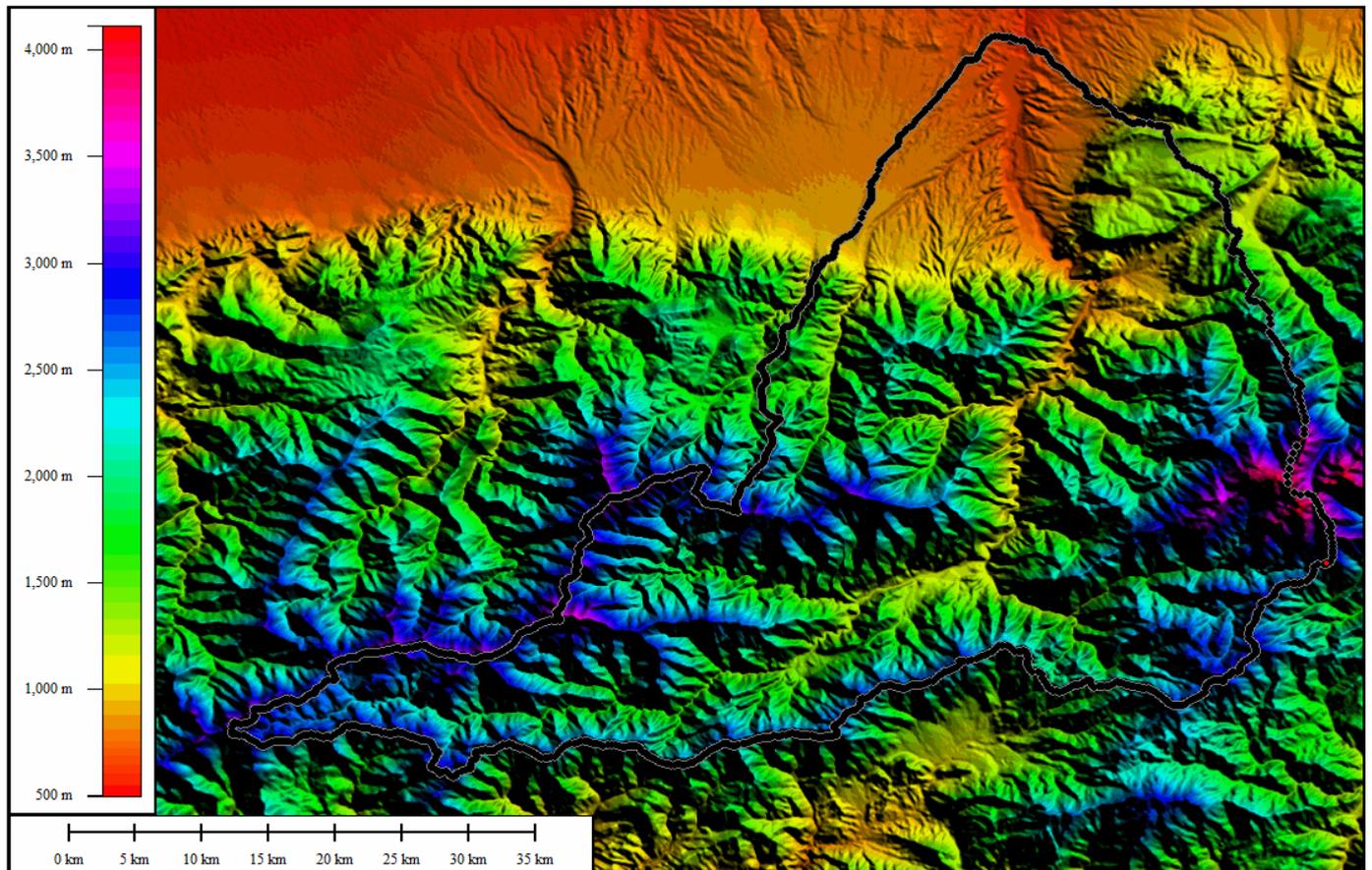


Fig.2 : *Carte hypsométrique du bassin du N'Fis.*

la courbe hypsométrique (fig.3) qui représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude, est obtenue en mesurant les surfaces unitaires correspondantes aux tranches d'altitudes et en leur attribuant les pourcentages de la surface totale (tab 1).

<i>Tranches d'altitudes(m)</i>	<i>Surfaces élémentaires (km²)</i>	<i>Fractions de surface(%)</i>
770-800	1,4	0,1
800-1200	89,6	7
1200-1600	193	15
1600-2000	305	23,82
2000-2400	322,6	25,2
2400-2800	223,4	17,44
2800-3200	107,6	8,4
3200-3600	27,7	2,16

3600-4000	9,8	0,76
4000-4088	0,2	0,01
total	1280,3	99,89

Tab.1 : Répartition hypsométrique du bassin du N'Fis à Imin El Hammam.

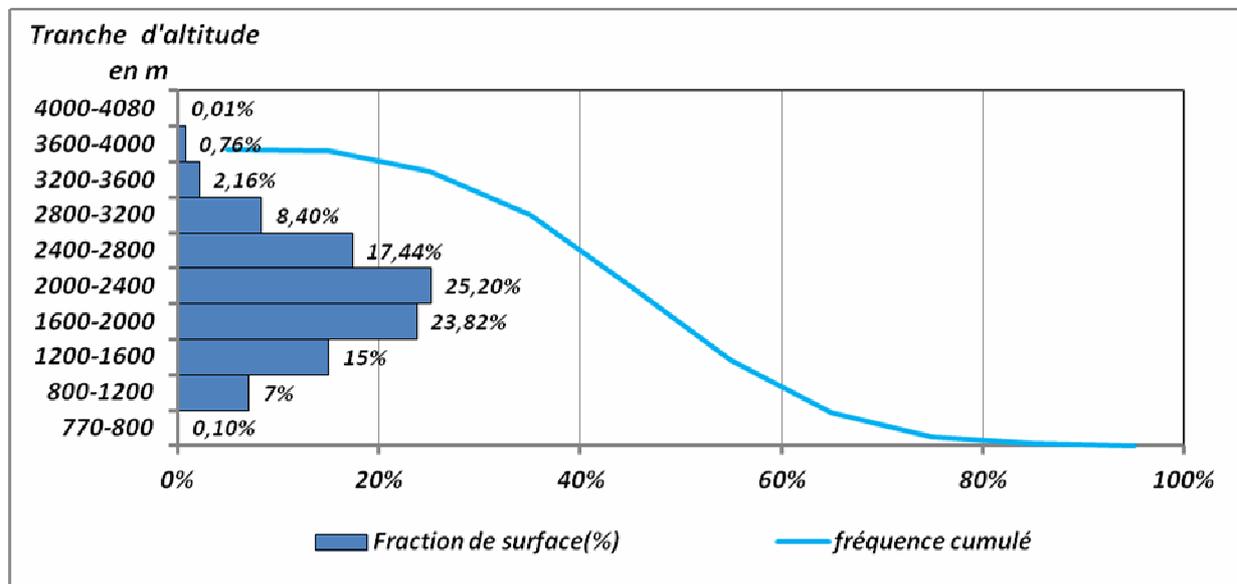


Fig.3 : Courbe hypsométrique du bassin du N'Fis à Imin El Hammam.

Pour le bassin versant du N'Fis à Imin El Hammam qui couvre une superficie de 1270 Km² avec un périmètre de 200Km, la répartition altitudinale est comme suit :

- L'altitude moyenne est de l'ordre de 2074m.
- L'altitude médiane (correspondant à la courbe hypsométrique au point d'abscisse 50% de la surface totale) est de 1800m.
- L'altitude la plus fréquente est située entre 2000 et 2400m et représente 25,20%.

2. Caractéristiques de forme :

a. Indice de compacité de Gravelius KG :

L'indice de compacité est l'une des caractéristiques de forme les plus essentielles d'un bassin versant car il permet l'évaluation globale du réseau de drainage ; par exemple : plus le bassin versant est compact, plus sa forme est ramassée, plus l'indice de Gravelius est faible et plus le temps de rassemblement des eaux vers l'exutoire sera court.

Ce coefficient est destiné à comparer la forme d'un bassin versant à celui d'un cercle de même surface, il est donné par la formule suivante :

$$KG=28P/(A)^{1/2}$$

A=aire du BV (Km²)

P=périmètre du BV (Km)

Pour le N'Fis à Takerkoust, on a : A=1707Km² , P=245Km et KG=1,66

Il est a peu près 7 fois plus long que large, c'est le bassin le plus allongé du Haut-Atlas du Marrakech (Rheraya 1,4 ; Ourika 1,3 ; Zat 1,6 et R'Dat 1,5.)

Cette forme allongée va permettre d'avoir un léger amortissement des ruissèlements ce qui empêcherait l'aboutissement de toutes les matières véhiculées par le ruissèlement à l'aval.

b. Rectangle équivalent :

Il s'agit d'une transformation géométrique du bassin versant en un rectangle de longueur L et de largeur l ayant le même périmètre et la même surface que le bassin versant Il est défini pour comparer facilement les bassins entre eux.

$$L=(KG(A)^{1/2})/1,12 (1+(1-(1,12/KG)^2)^{1/2}) \quad l=(KG(A)^{1/2})/1,12 (1-(1-(1,12/KG)^2)^{1/2})$$

Le N'Fis peut être représenté par un rectangle équivalent de longueur L=106,48Km et de largeur l=15,21Km.

c. Pente moyenne :

C'est un critère très important qui nous renseigne sur la topographie du bassin versant.

La longueur de la pente et son inclinaison influencent directement le taux des apports solides ; les pentes les plus longues permettent une plus forte accumulation des ruissèlements, ce qui accroît l'énergie globale de celui-ci et ses possibilités de détachement et de transport.

L'oued N'Fis présente une pente moyenne de tous les versants de l'ordre de 3,5 % , et une pente moyenne de l'oued de l'ordre de 2,5 %. Cette pente est relativement douce par rapport aux autres bassins du Haut-Atlas du Marrakech (Rheraya 7,2 % , Ourika 6,9 , Zat 4,8 , R'Dat 3,2).

Distance Km	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	>60
Pente de l'oued	1/100 – 1/60	1/100- 1/200	1/93 - 1/100	1/110	1/120	1/100	1/70- 1/6

Tab 2 : Classes des pentes de l'oued N'Fis a Imin El Hammam en fonction de la distance.

On remarque que le N'Fis a une pente douce avec 1/50 et 1/110. Les sections de l'oued que l'écoulement de débris peut atteindre sont situées à plus de 60 Km, ces sections correspondent aux lignes de pentes 1/70 et 1/6.

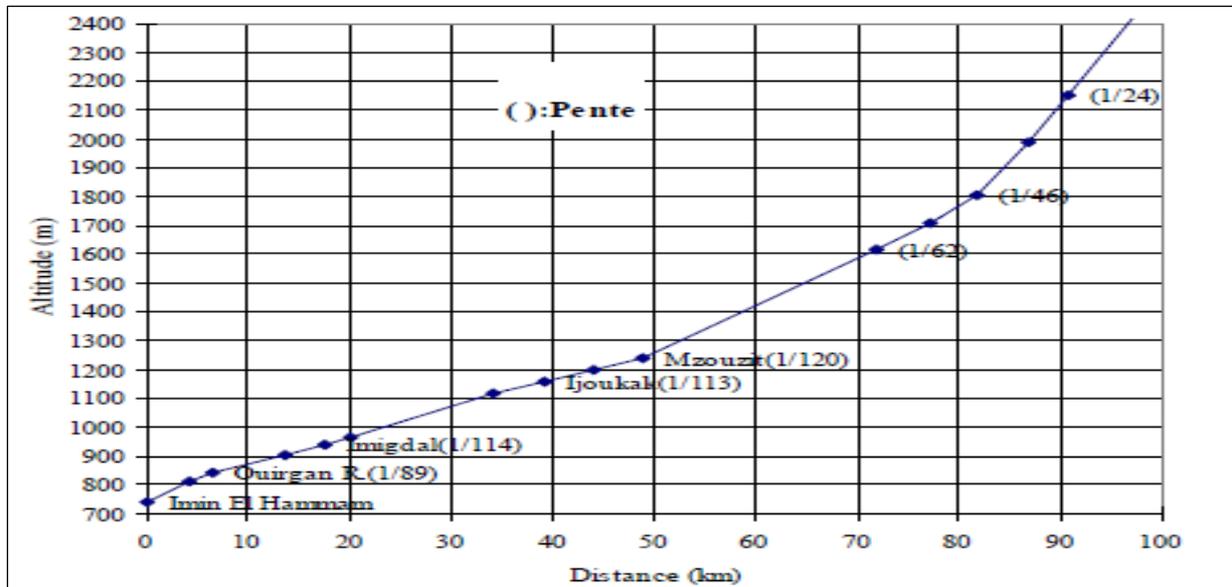


Fig. 4 : Profil en long de l'oued N'Fis.

d. Temps de concentration :

Pour ce paramètre on tient compte des caractéristiques géométriques et morphologiques du bassin versant. Il est donné par la relation de Giadot :

$$TC = (4S)^{1/2} + 1,5 * L / 0,8(H_{moy} - H_{min})^{1/2}$$

S=surface du bassin versant (Km²)

H.moy=altitude moyenne (m)

L=longueur du rectangle équivalent (km)

H.min=altitude à l'exutoire (m)

Le temps de concentration du bassin versant du N'Fis à Imin El Hammam : TC=8h30min. Il correspond au temps maximal nécessaire au ruissèlement en provenance du point le plus éloigné d'atteindre l'exutoire.

Conclusion : le tableau 3 ci-dessous résume les caractéristiques physiques du bassin versant du N'Fis :

Superficie du BV (Km ²)	1707	Altitude moyenne (m)	2074
Périmètre du BV (Km)	245	Altitude maximale (m)	4088
Indice de compacité KG	1,7	Altitude minimale (m)	770
Temps de concentration	8h30min	Pente moyenne de l'oued (%)	2,5
Longueur du rectangle équivalent (Km)	106,48	Pente moyenne de tous les versants (%)	3,5
Largeur du rectangle équivalent (Km)	15,21	Longueur du talweg principal (Km)	82

Tab.3 : Caractéristiques morphologiques du bassin versant du N'Fis.

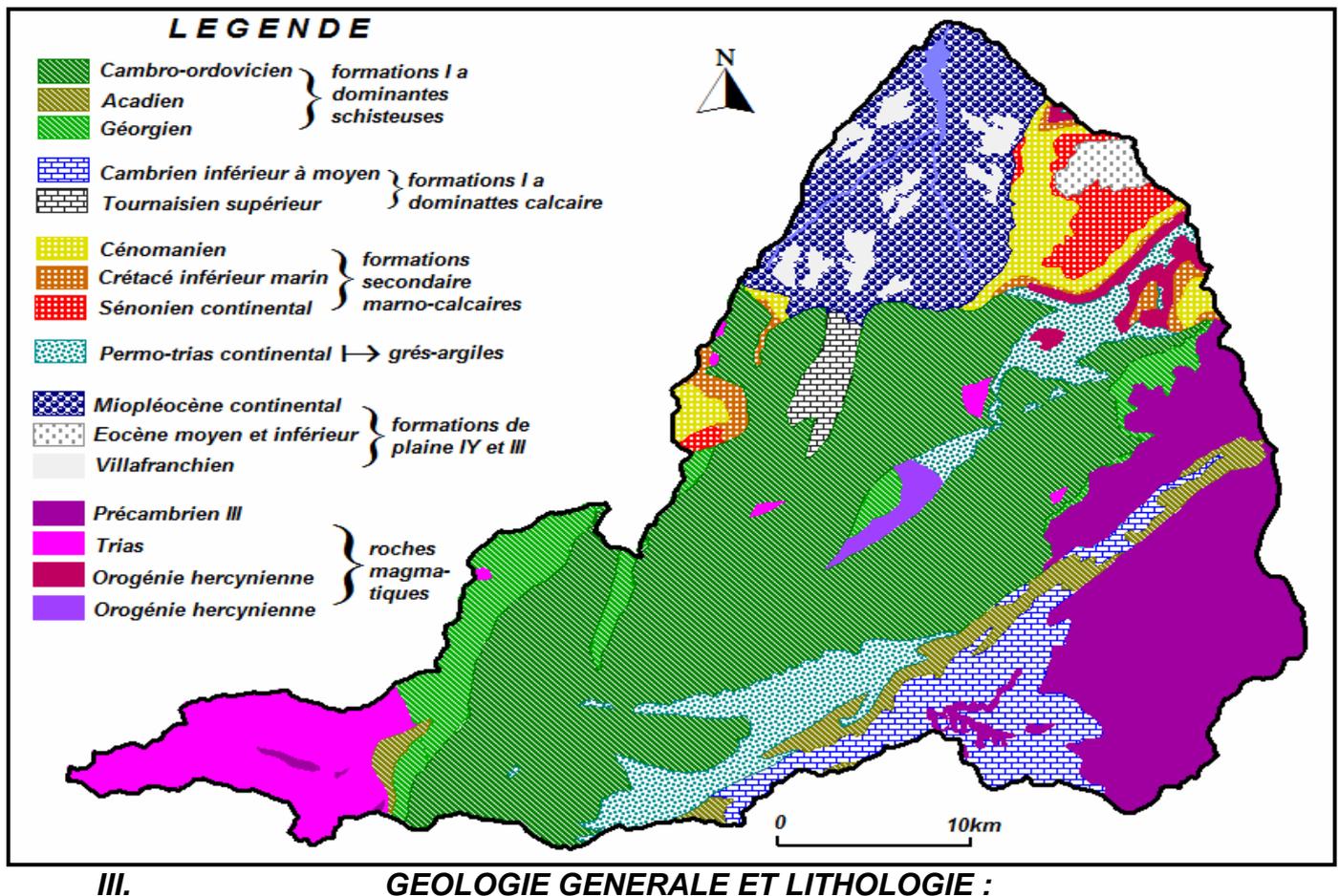


Fig.5: Carte géologique du bassin versant du N'Fis (extrait de la carte géologique de Marrakech au 1/500 000).

L'analyse de la carte géologique du bassin versant du N'Fis (fig. 5) montre que :

- La grande partie du bassin et plus particulièrement la partie montagneuse est constituée essentiellement de schistes et de calcaires d'âge Primaire. Cette partie est parsemée par des petites formations permo-triasique caractérisées par la dominance de grés et d'argiles.
- Au Sud-est comme au Sud-ouest du bassin ; on remarque l'abondance des grandes massifs granitiques, tandis qu'au Nord de ce secteur on note l'existence des formations de plaine d'âge Tertiaire et Quaternaire, et sans inclus les formations secondaires marno-calcaires localisées en partie importante au Nord-est et en petite partie au Nord-ouest du bassin.

On peut dire que le bassin versant du N'Fis est essentiellement schisteux, le reste est répartie entre les grés permo-triasiques au niveau des cuvettes , des calcaires et le granite qui domine le plateau deTichka. (El Wahidi 2004)

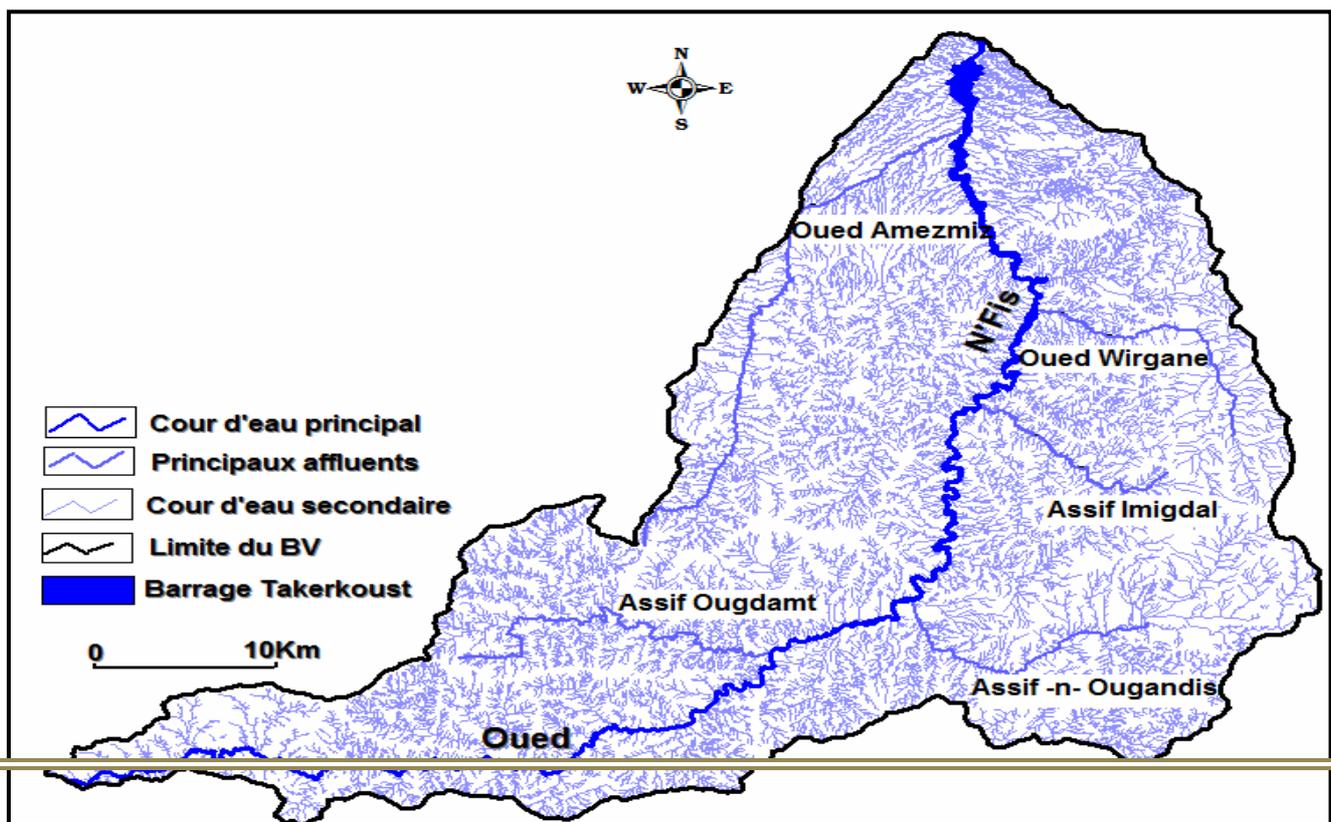
De point de vue pédologique , le N'Fis est caractérisé par la dominance des terrains imperméables avec une répartition de 20% de sols perméable, 9% de sols semi-perméable et 71% de sols imperméable. (ABHT)

IV. ORGANISATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE :

Le réseau hydrographique d'un bassin versant se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels et artificiels , permanents ou temporaires qui participent à l'écoulement au sein de ce bassin.

Le réseau hydrographique de l'oued N'Fis (fig.6) mesure au total 3322 km environ au barrage Takerkoust, son cours principal mesure 152 km jusqu'à la confluence avec l'oued Tensift.

Ce réseau est caractérisé par une forte densité de drainage de l'ordre de $1,97\text{km}/\text{km}^2$. Il en résulte une forme arborescente et dendritique (très ramifiée) du



réseau hydrographique, ce qui pourrait accentuer la brutalité des crues.

Fig.6 : Carte du réseau hydrographique du bassin du N'Fis

Les principaux affluents de l'oued N'Fis sont : (fig.6)

- L'oued Amezmiz : affluent rive gauche draine un bassin de 105 km² à la station Sidi hssain de N°2431/53, en service depuis janvier 1988.
- Assif Ougdamt : affluent rive gauche qui prend naissance aux environs d'Igdat à une altitude de 3616 m.
- L'oued Ouirgane : affluent rive droite qui prend naissance dans la région Tazagant à une altitude de 3650 m.
- Assif Imigdal : affluent rive droite qui prend naissance à l'altitude 3400m.
- Assif-n-Ougandis : affluent rive droite qui prend naissance dans la région d'Ouanoukrim à une altitude de 3600m.

Le réseau de séguias se développe à l'aval du barrage Takerkoust, il existe 31 séguias (voir annexe 1) qui prélèvent environ 83% des apports de l'oued N'Fis (étude SBOT période 1946-1986).

V. OCCUPATION DES SOLS :

La densité et le type de végétation ont un rôle fondamental dans la protection du sol contre l'impact des gouttes de pluie, ils tendent à ralentir la vitesse de ruissellement et permettent une meilleure infiltration.

Le tableau 4 montre l'occupation des sols du bassin N'Fis :

<i>Occupation des sols</i>	<i>Superficie km²</i>
Forets	642
Vergers	30
Agricultures	509
Pâturages / terrains nus	483
Terrains rocheux	43
Total	1707

Tab.4 : Occupation des sols du bassin du N'Fis (d'après DREFM)

Le tableau montre que 526 km², soit 30,81% de la superficie totale du bassin versant du N'Fis est constituée essentiellement de terrains nus et rocheux. Les terres labourables d'une superficie de 509 km² (environ 30%) accentuent plus encore l'impact d'érosion sur la totalité du bassin versant. Ceci engendrera des conséquences imprévisibles sur la retenue du barrage à l'aval.

Le boisement est constitué essentiellement de :

- chaine vert au sommet .
- thuya.
- cyprès de l'Atlas.
- Genévrier rouge.
- lentisque.
- oléastre.
- Caroubier , Jujubier , Doum...

La seule carte d'occupation des sols dont on dispose est celle qui a été réalisé par Al Ifriqi. M en 1986 (Fig.7). Elle concerne seulement la rive gauche du bassin en partie et plus particulièrement la région d'Amezmiz et une petite partie au Nord de Talat-N-Ya'Qoub.

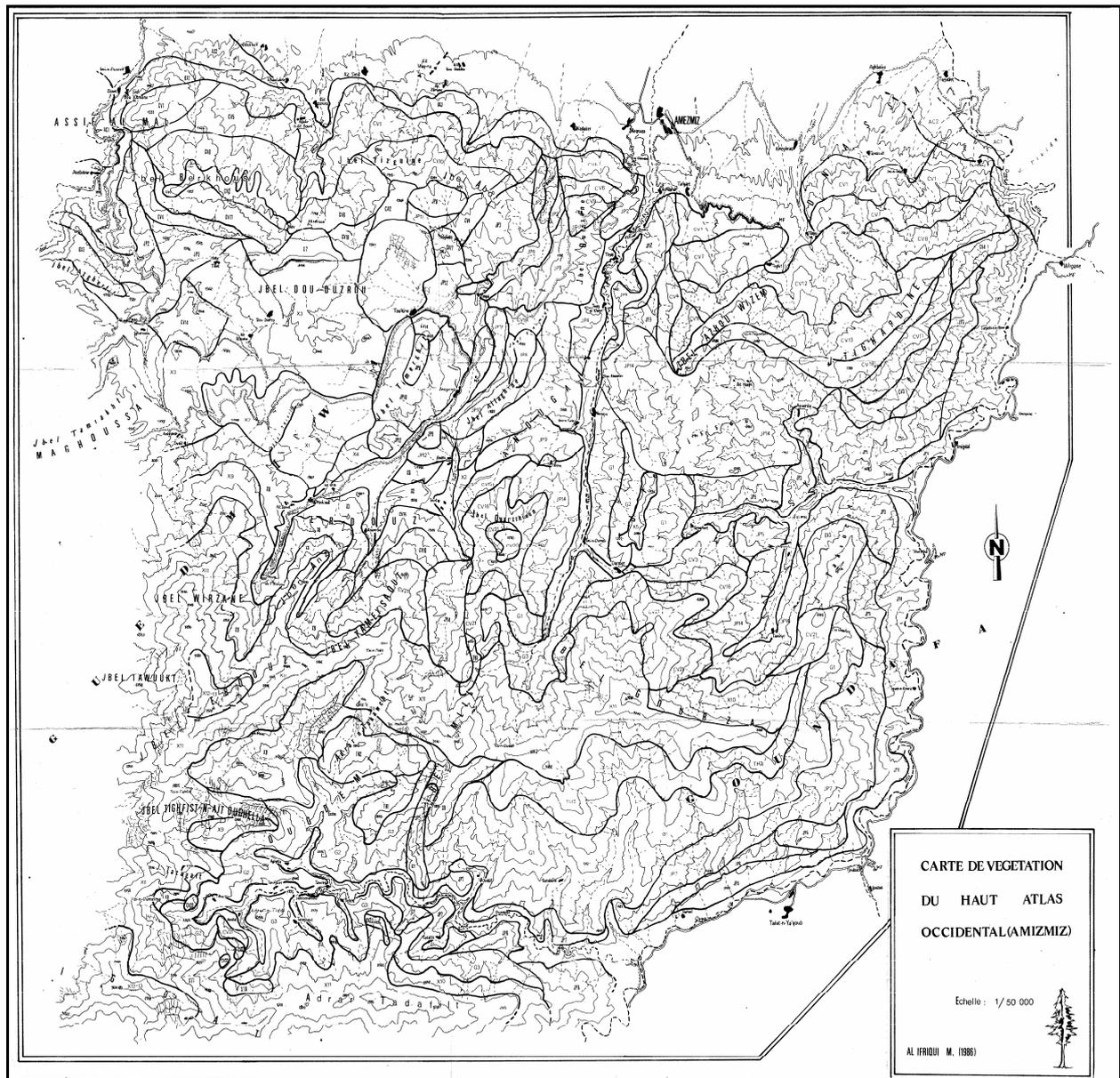


Fig. 7 : Carte de végétation de la rive gauche du bassin du N'Fis (Al Ifriqui.M ; 1986)

V. CARTE DE VULNERABILITE DU BASSIN VERSANT DU N'FIS :

En premier lieu le but principal de cette étude été l'établissement d'une carte de sensibilité à l'érosion du bassin versant du N'Fis afin de démontrer le rattachement entre les caractéristiques hydrologique et géomorphologique de ce bassin et l'envasement du barrage de Takerkoust en aval. Mais le manque de la carte d'occupation des soles a rendu cette tâche incomplète.

Malgré cette contrainte involontaire et a l'aide d'une superposition de la carte géologique et la carte hydrologique nous avons pu établir la carte qui est entre vos mains (fig. 8).

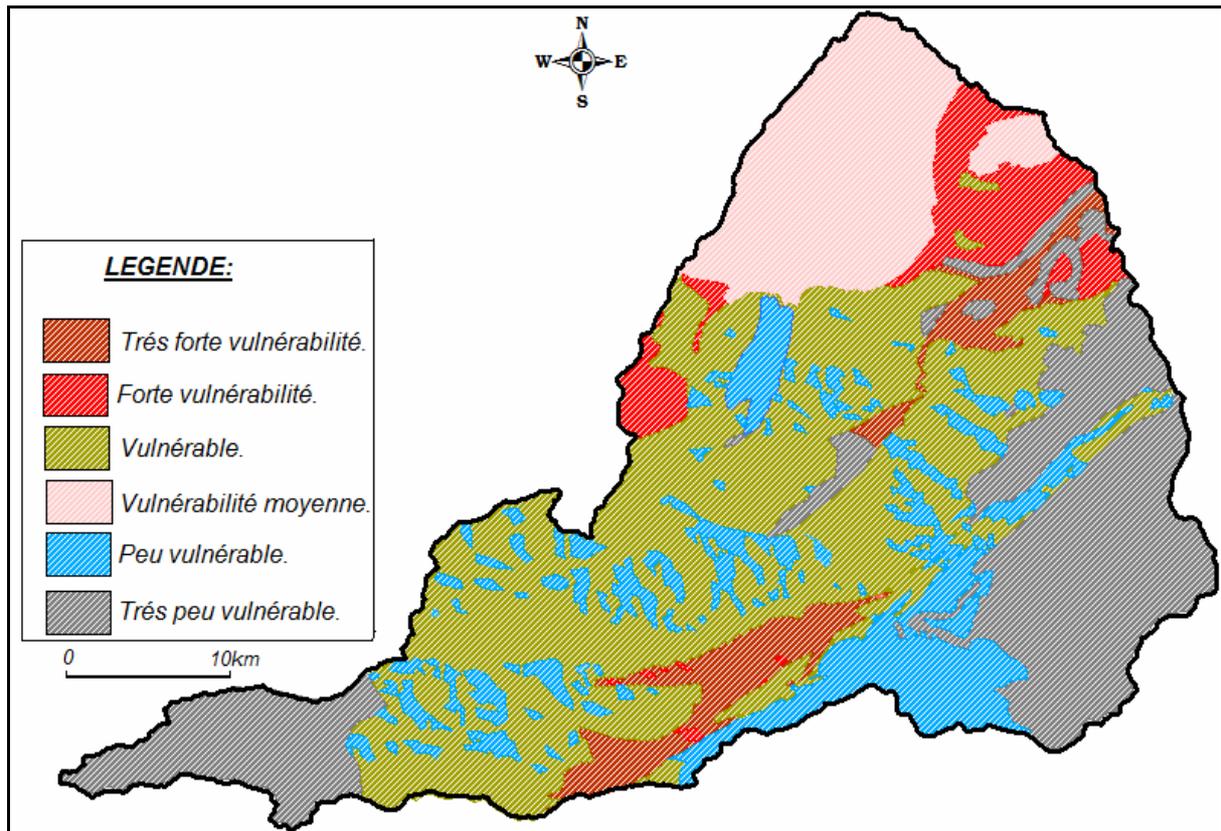


Fig.8 : Carte de vulnérabilité du bassin du N'Fis.

I. REGIME PLUVIOMETRIQUE DU BASSIN ET REGIME HYDROLOGIQUE DE L'OUED :

Les données pluviométriques ont été fournies par l'ABHT (Annexe 2) , elles concernent la station d'Imin El Hammam située à l'aval du bassin versant aux coordonnées Lambert suivantes :

X=241.400 , Y=72.400 et Z=780NGM .

1. Régime pluviométrique du bassin :

Le bassin versant du N'Fis est soumis à un climat semi-aride caractérisé par des précipitations généralement faibles avec une grande hétérogénéité spatio-temporelle.

La pluviométrie moyenne est de 426,4 mm/an, et les précipitations maximales annuelles atteignent 700 mm dans les hautes montagnes. De point de vue température, les mesures prises au barrage de lalla Takerkoust montrent une température moyenne de 18,6°C, avec une température maximale absolue de 46°C et une température minimale absolue de -7,5°C.

a. Précipitations moyennes mensuelles : (1968-2010)

Elles sont obtenues par le calcul de la moyenne arithmétique des données mensuelles de chaque année.

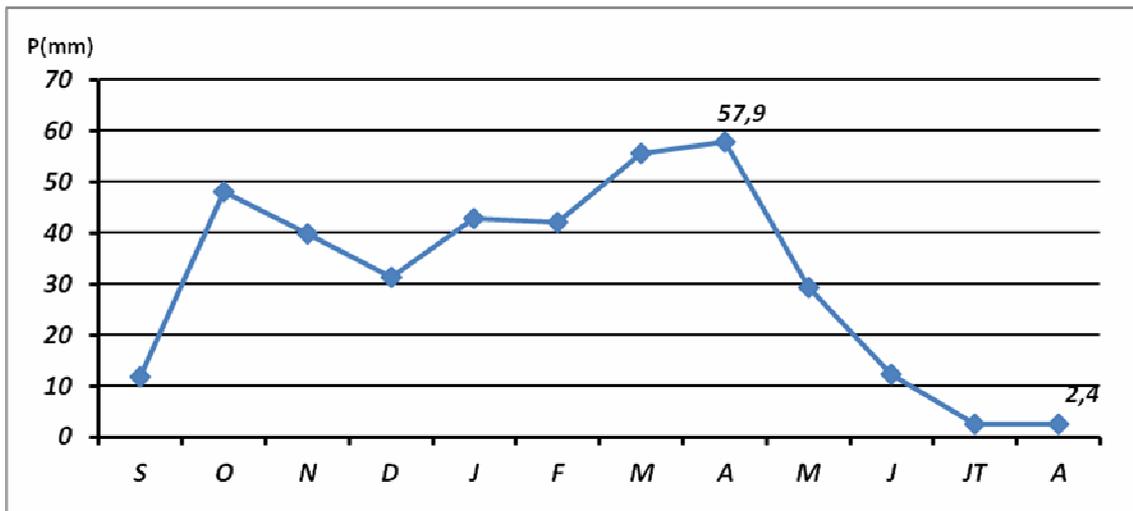


Fig.9 : Précipitations moyennes mensuelles de N'Fis à Imin El Hammam.

La moyenne mensuelle des précipitations est de 31,31 mm.

D'après la courbe, on peut distinguer deux périodes :

- Une période humide qui s'étend depuis le mois d'octobre jusqu'au mois d'Avril avec des hauteurs supérieures à 30 mm et ne dépassent pas les 60 mm.
- Une période sèche depuis Mai jusqu'au le mois de Septembre avec des hauteurs inférieures à 30 mm.

Le mois le plus arrosé est le mois d'Avril avec une hauteur de 58mm.

Le mois le moins arrosé est le mois d'Aout avec une hauteur inférieur à 3mm.

b. Précipitations moyennes saisonnières : (1968-2010)

Les précipitations saisonnières ont été calculées à partir des données mensuelles.

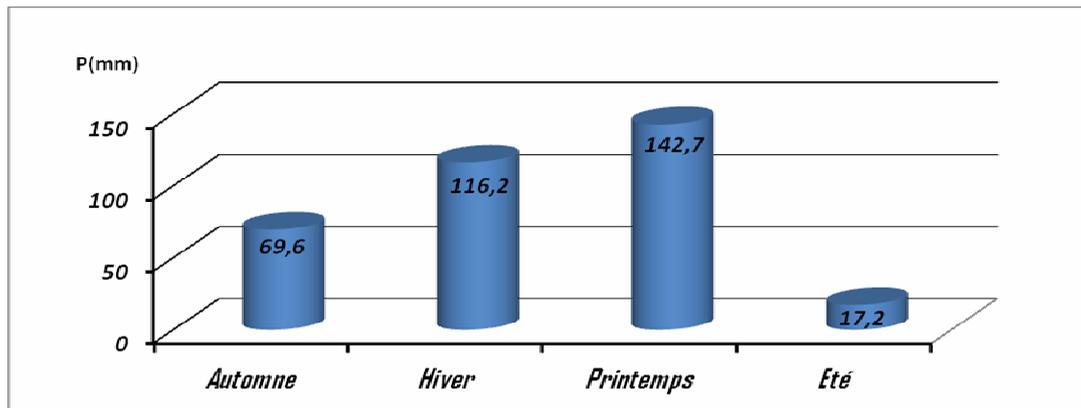


Fig.10 : Précipitations moyennes saisonnières de N'Fis à Imin El Hammam.

Nous pouvons constater que les précipitations sont plus abondantes au printemps (142,7 mm) .

La saison la plus sèche est l'été avec une hauteur de 17 mm.

c. Précipitations moyennes annuelles : (1968-2010)

Elles sont obtenues par sommation des moyennes mensuelles de chaque année.

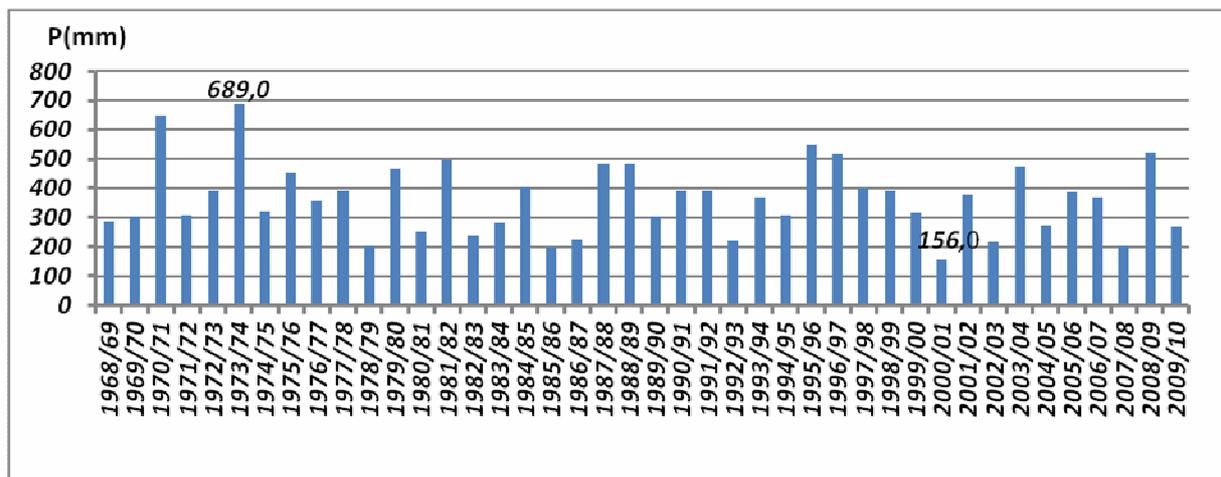


Fig.11 : Précipitations moyennes annuelles de N'Fis à Imin El Hammam.

L'analyse de l'histogramme montre une répartition irrégulière des précipitations d'une année à l'autre avec un module annuel de 363,4 mm.

Les années 70-71, 73-74 , 95-96 , 96-97 et 08-09 sont les plus pluvieuses avec une hauteur qui dépasse largement la moyenne.

Les années 85-86 et 2000-2001 sont les plus sèches avec une hauteur inférieure à 200 mm.

Le maximum pluvieux est de l'ordre de 689 mm enregistré en 73-74.

Le minimum pluvieux est de l'ordre de 156 mm enregistré en 2000-2001.

2. Régime hydrologique de l'oued :

a. Variations mensuelles des débits : (1965-2009)

Elles sont obtenues par le calcul de la moyenne arithmétique des débits mensuels de chaque année (Annexe 3). La courbe montre une répartition bimodale des débits :

- le premier pic est enregistré au mois de Novembre, c'est un écoulement d'origine pluvial.
- Le second pic est le plus important, il est enregistré au printemps (mois de Mai et d'Avril) ; c'est un écoulement résultant de la combinaison des pluies et de la fonte des neiges. Le régime est donc pluvio-nival.

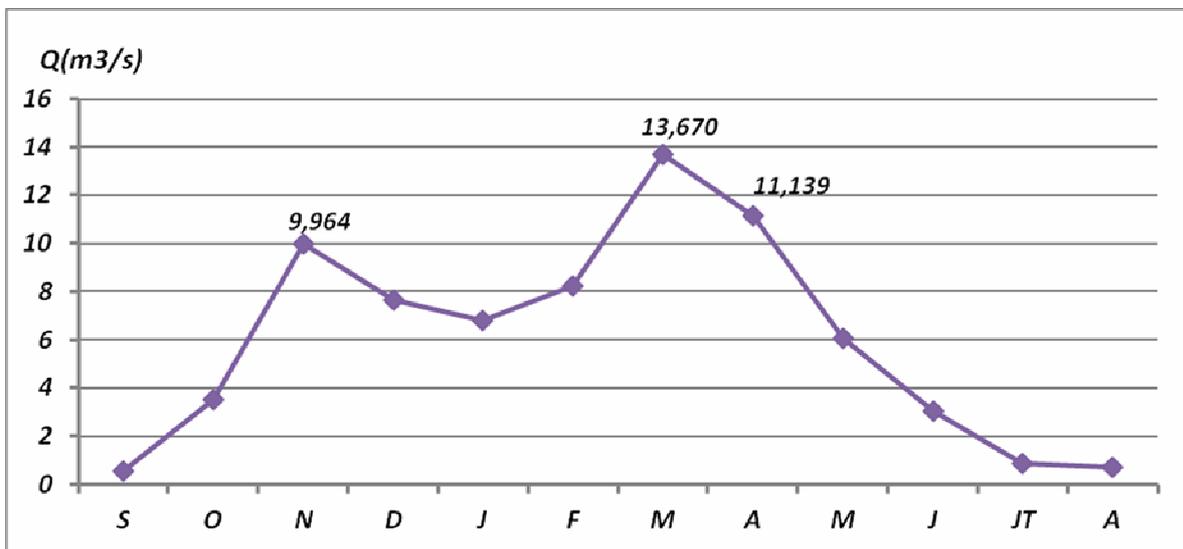


Fig.12 : Débits moyens mensuels de N'Fis à Imin El Hammam.

b. Variation saisonnière des débits : (1965-2009)

Les débits saisonniers ont été calculés à partir des débits mensuels.

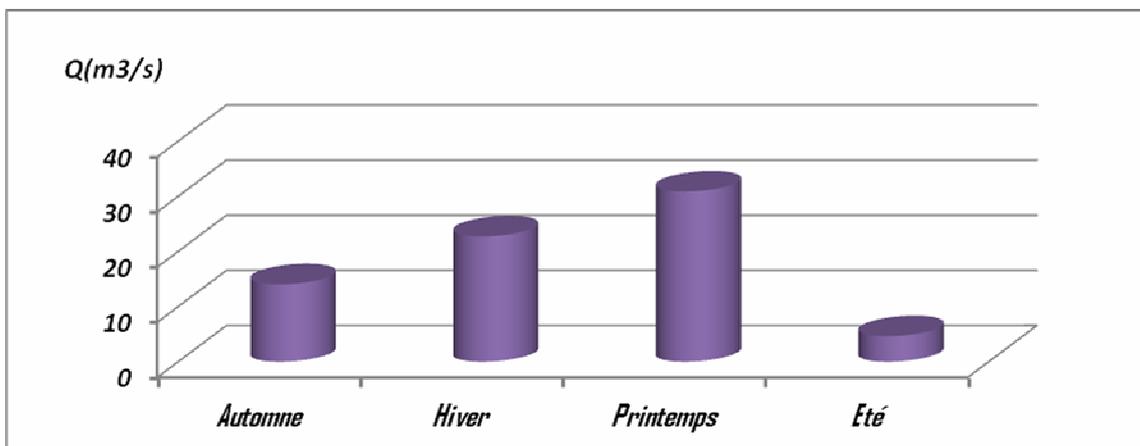


Fig.13 : Débits moyens saisonniers de N'Fis à Imin El Hammam.

On remarque que les débits du printemps sont les plus élevés ($30,875 \text{ m}^3/\text{s}$), suivi par ceux de l'hiver puis d'automne avec des moyennes respectives de $22,732 \text{ m}^3/\text{s}$ et $14,041 \text{ m}^3/\text{s}$. Les écoulements d'été sont les moins importants avec une moyenne de $4,64 \text{ m}^3/\text{s}$.

c. Variation annuel des débits : (1965-2009)

Les débits moyens annuels sont calculés en additionnant les débits moyens journaliers et en divisant le total par le nombre de jour de l'année.

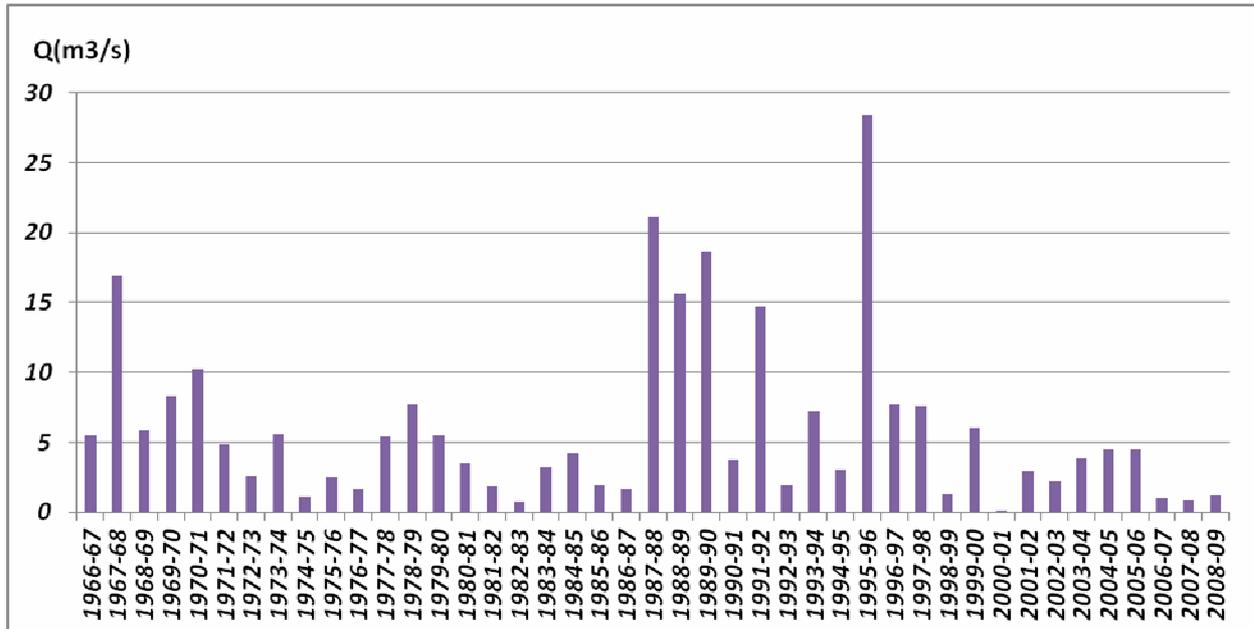


Fig. 13 : Débits moyens annuels de N'Fis à Imin El Hammam.

L'histogramme montre une répartition irrégulière des débits, les années 67-68, 87-88, 88-89, 89-90 et 95-96 présentent un débit remarquable qui dépasse largement la moyenne ($6,024 \text{ m}^3/\text{s}$) avec une hauteur maximale de $28,442 \text{ m}^3/\text{s}$ enregistrée en 95-96. Les autres années ont enregistrées des débits variant entre une valeur maximale de $10,273 \text{ m}^3/\text{s}$ en 70-71 et une valeur minimale de $0,104 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2000-2001.

3. Corrélation pluie-débit :

La corrélation met en évidence la contribution de la pluie sur les débits à l'exutoire du bassin versant.

Les fig.14a et 14b montrent respectivement le lien existant entre les précipitations et les débits moyens mensuels et annuels à la station d'Imin El Hammam.

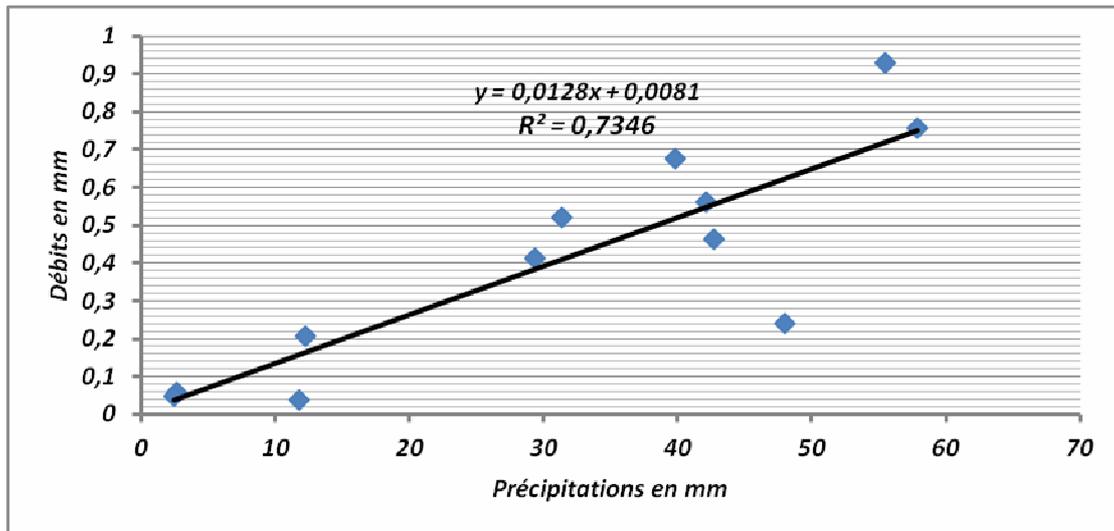


Fig. 14 a : Corrélation pluie-débit mensuels de N'Fis à Imin El Hammam.

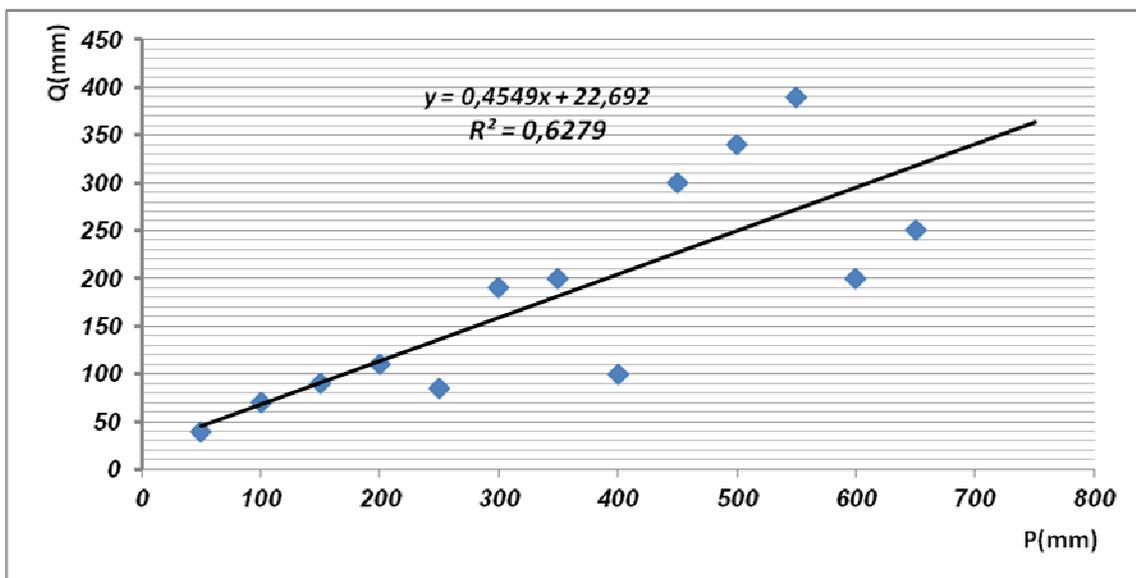


Fig. 14 b : Corrélation pluie-débit annuels de N'Fis à Imin El Hammam.

Dans les deux cas le coefficient de corrélation est élevé, il est de l'ordre de 0,7 pour les précipitations et les débits mensuels, et de 0,6 pour les précipitations et les débits annuels. Donc les débits et les pluies sont étroitement liés.

VI. **ETUDE DYNAMIQUE DES CRUES ET ANALYSE DES HYDRO GRAMMES :**

Les données sont fournies par l'ABHT, elles concernent la station d'Imin El Hammam. (Annexe 4).

1. Analyse des hydro grammes des crues :

Dans cette partie nous allons analysés les hydro grammes des crues les plus importantes qui ont affectés le bassin du N'Fis sur une période de 40 ans (1966-2006)

a. La crue du 13 Novembre 1967 :

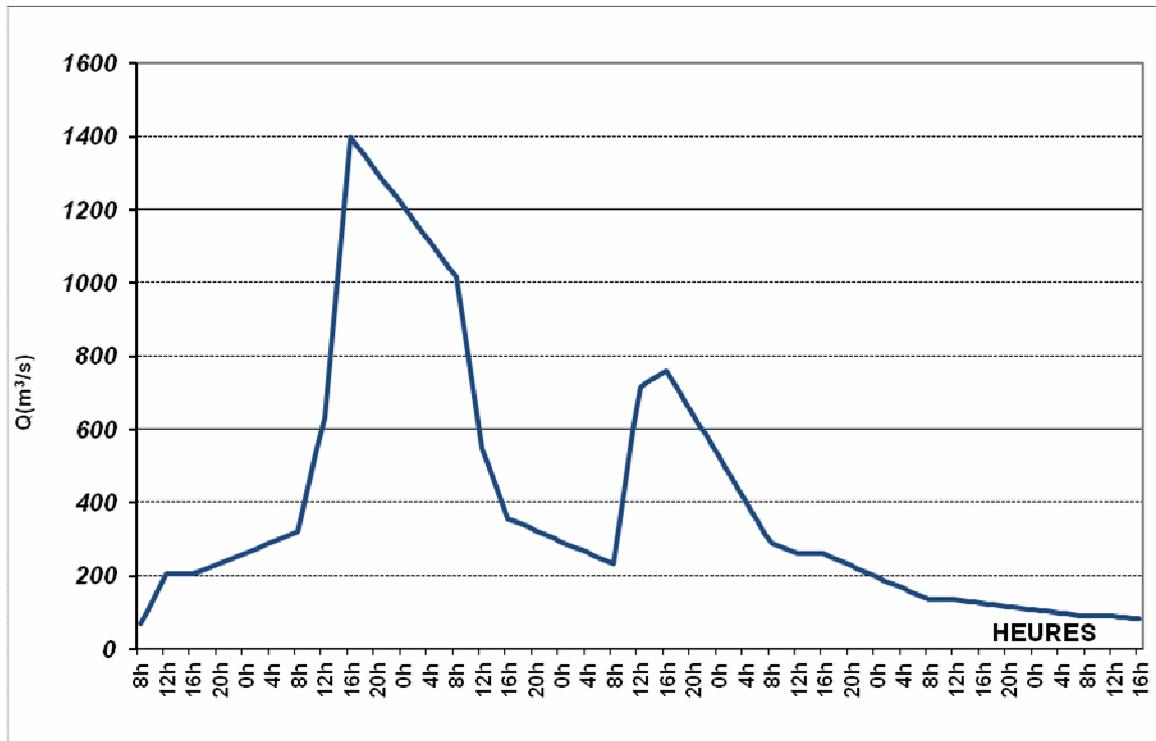


Fig. 15 : Hydro gramme de la crue du 13/11/1967.

La figure 15 représente l'hydro gramme de cette crue. Il s'agit d'une crue complexe avec deux pics.

Elle a durée environ 6 jours passant de 68m³/s à 1400m³/s pendant 32 heures pour le premier pic qui est suivi par une décrue où le débit a diminué jusqu'à 232m³/s. Un second pic a été enregistré dont le débit a atteint 762m³/s pendant 8h.

Le premier pic peut être expliqué par des orages à l'aval du bassin versant, tandis que le second pic peut être due à l'arrivée des eaux des affluents, collectées plus tard.

date début	12/11/1967 à 8h
date fin	18/11/1967 à 16h
débit de pointe (m ³ /s)	1400,000
débit max. moyen (m ³ /s)	338,861
débit base avant (m ³ /s)	68,000
débit base après (m ³ /s)	82,000
volume 10 ⁶ m ³	184,205
temps de base (heures)	151
temps de montée (heures)	32
coefficient de pointe	4,1

Tab.5 : Caractéristiques de la crue du 13/11/1967.

Le tableau 5 montre que cette crue est caractérisée par un débit de pointe élevé (1400m³/s), un long temps de base (151h), et par volume important des eaux mobilisées (184,21 10⁶m³/s), mais aussi par un temps de montée très long ce qui limite sa gravité et ses dégâts.

b. La crue du 17 Aout 1995 :

Il s'agit de la célèbre crue du 17-08-1995 qui a affecté les trois sous bassin du Tensift : le N'Fis, l'Ourika et la Rheraya, et qui a causé un bilan catastrophique sur les plans humain et matériel (Saidi et al., 2003).

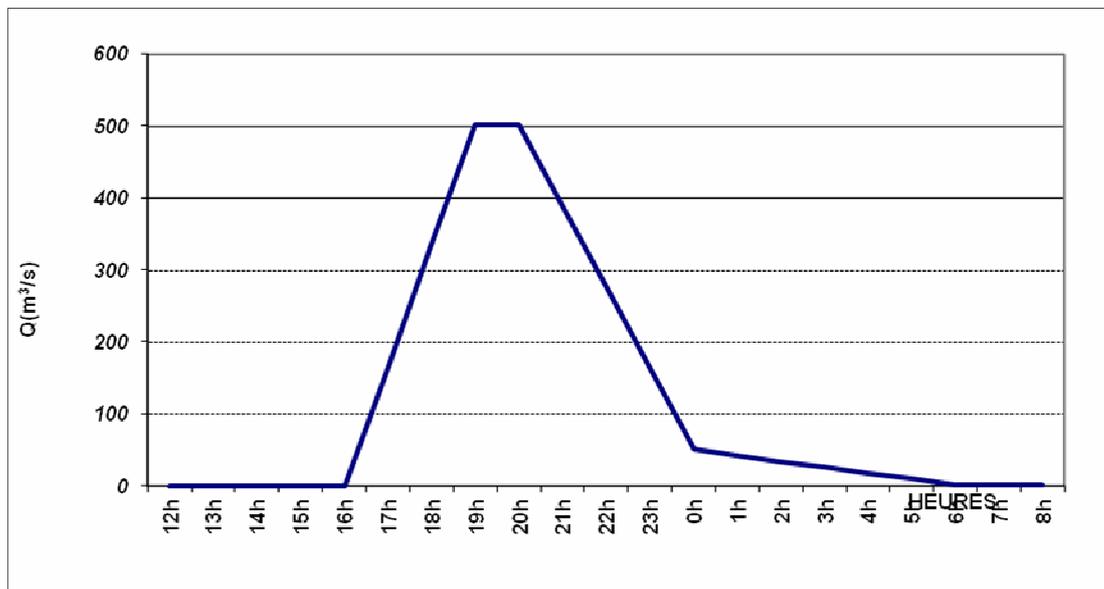


Fig.16 : Hydro gramme de la crue du 17/08/1995.

<i>date début</i>	17/08/1995 à 16h
<i>date fin</i>	18/08/1995 à 6h
<i>débit de pointe (m³/s)</i>	501,000
<i>débit max. moyen (m³/s)</i>	192,146
<i>débit base avant (m³/s)</i>	0,000
<i>débit base après (m³/s)</i>	1,580
<i>volume 10⁶ m³</i>	8,882
<i>temps de base (heures)</i>	13
<i>temps de montée (heures)</i>	3
<i>coefficient de pointe</i>	2,6

Tab.6 : Caractéristiques de la crue du 17/08/1995.

La figure 16 et le tableau 6 montrent qu'il s'agit d'une crue simple (1 seul pic) monoginique, mais qui est caractérisée par un temps de montée très rapide de 3h et par un débit de pointe important de 501m³/s.

A l'échelle du bassin versant N'Fis, cette crue a causé d'énormes dégâts :

- Au niveau de l'affluent Ouirgane : une portion du pont a été détruite et 900ha de terres agricoles ont été inondées.
- Au niveau de l'affluent Imigdal : le petit pont de l'oued a été détruit.
- Au niveau de l'affluent Tasaft : la route a été endommagée.

c. La crue du 28 Octobre 1999 :

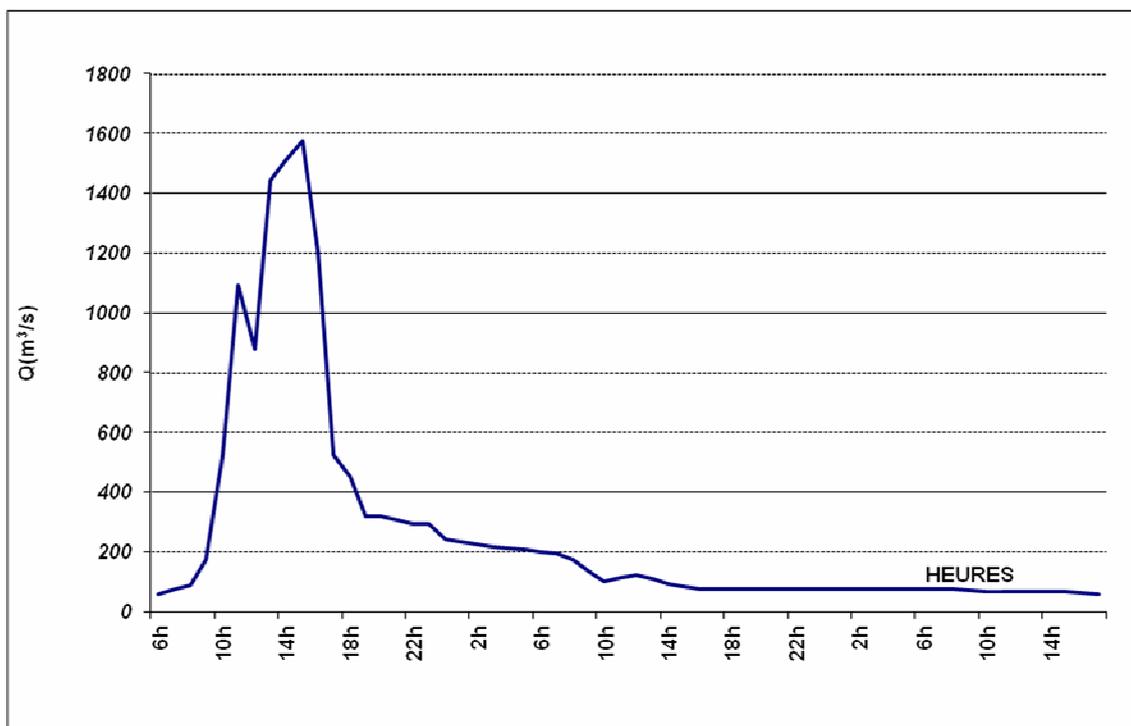


Fig.17 : Hydro gramme de la crue du 28/10/1999.

<i>date début</i>	28/10/1999 à 6h
<i>date fin</i>	30/10/1999 à 17h
<i>débit de pointe (m³/s)</i>	1575,000
<i>débit max. moyen (m³/s)</i>	208,200
<i>débit base avant (m³/s)</i>	59,700
<i>débit base après (m³/s)</i>	59,700
<i>volume 10⁶ m³</i>	43,500
<i>temps de base (heures)</i>	58
<i>temps de montée (heures)</i>	9
<i>coefficient de pointe</i>	7,6

Tab.7 : Caractéristiques de la crue du 28/10/1999.

La figure 17 et le tableau 7 montrent qu'il s'agit d'une crue simple, caractérisée par un débit de pointe de 1575m³/s (c'est le débit le plus élevé qu'a connu ce bassin), un temps de montée rapide de 9h et un temps de base de 58h.

Cette crue exceptionnelle a entraîné la destruction de la , la route régionale 203 par les débris provenant des affluents,. Une superficie agricole de 2160ha a également été inondée.

Notons qu'en raison de sa grande superficie, et de sa forme allongée ; les hydrogrammes observés au niveau du bassin versant N'Fis sont étalés et les crues s'étendent sur une grande période.

2. Temps de base et temps de montée des crues :

a. Temps de base :

La figure 18 montre que la majorité des crues du N'Fis (plus de 70%) ont un temps de base dépassant les 50h, les crues durent donc plus de deux jours car la superficie du bassin est assez grande (1270 à lmin El Hammam)



Fig.18 : Temps de base des crues du N'Fis (1966-2006).

b. Temps de montée :

La majorité des crues ont un temps de montée entre 4 et 30h (fig.19). L'intervalle de 4-10h est la plus fréquente ce qui accentue le risque des crues imprévisibles.

Les crues du N'Fis sont donc caractérisées par un temps de montée très court (4-10h) et un temps de base très long (>50h) ; Ce sont les caractéristiques des crues dangereuses.

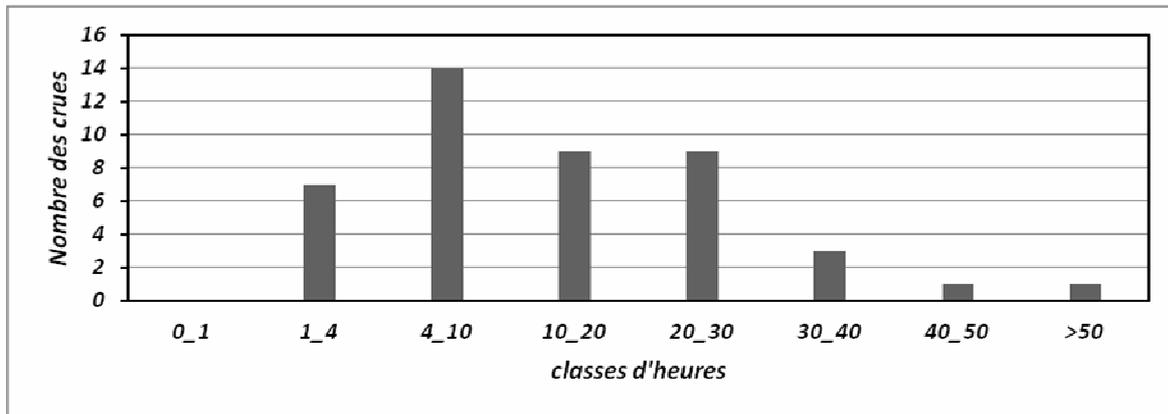


Fig.19 : Temps de montée des crues du N'Fis (1966-2006).

3. Répartition saisonnière et mensuelle des crues :

La figure 20 montre la répartition mensuelles des crues du N'Fis à la station d'Imin El Hammam.

On remarque que l'Automne arrive en premier avec 36%, suivi par l'Hiver et le Printemps avec le même pourcentage 28%, et enfin l'été avec 8%.

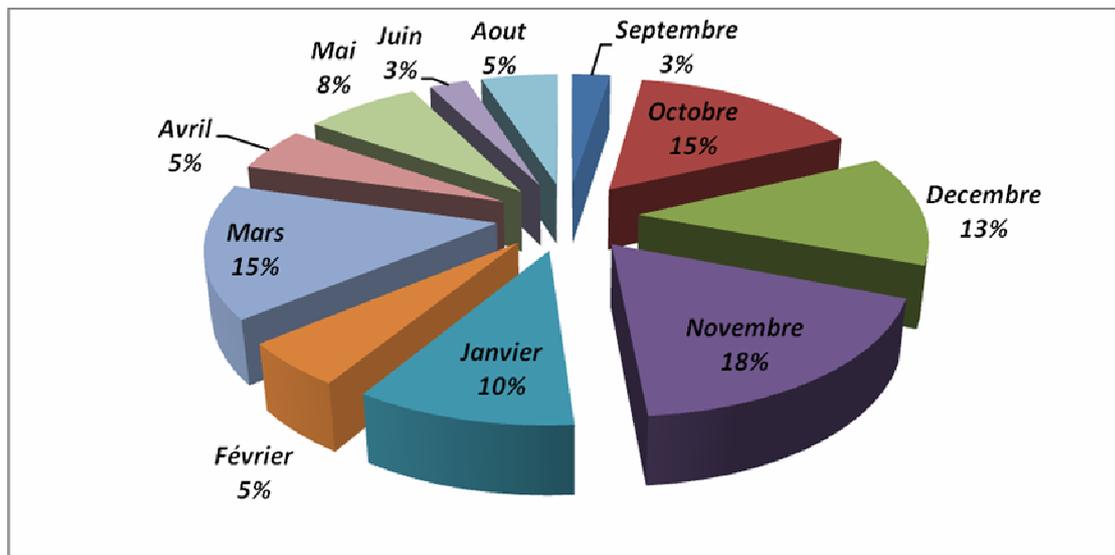


Fig.20 : Répartition mensuelle des crues du bassin du N'Fis.

Conclusion : le milieu physique de ce bassin offre un environnement propice aux fortes crues, notamment des pentes élevées, des sols imperméables (71%), un couvert végétal réduit et une pluviométrie conséquente.

Deuxième partie :
Conséquence sur
L'envasement de
Takerkoust

III. ENVASEMENT : DEFINITION ET GENERALITES :

1. Définition:

L'envasement est un amas terreux laissé par la mer ou les rivières suite à un phénomène d'érosion hydrique. Il est lié à plusieurs facteurs tels que les précipitations, la dégradation des sols, le relief, le manque de couvert végétal par l'action de la sécheresse ou par les interventions humaines (parcours extensif, labour dans les hautes montagnes et exploitation abusive des forêts, ...). Tous ces processus entraînent un fort drainage des matériaux en amont suivi d'un envasement des retenues en aval.

2. Principales méthodes d'étude de l'envasement :

La quantification de l'érosion fait appel à de nombreuses méthodes mises au point à travers le monde et dont les principales sont les suivantes :

- Méthodes de bathymétrie.
- Parcelles expérimentales.
- Etude des griffes d'érosion avec ou sans utilisation du SIG et de télédétection.
- Débits solides et étude des turbides.
- Etude des radios nucléaires.
- Modélisation de l'érosion par la méthode de Wischmeier.(Moukhchane.M)

Ces méthodes laissent apparaître un certain nombre d'erreurs qui limitent la spatialisation des équations des pertes en terre (BONN 1998) du fait que :

- i. Les sédiments générés par l'érosion peuvent être retenus par les trappes à différents endroits du bassin.
- ii. Les sédiments qui atteignent les retenues des barrages sont constitués par un mélange de sédiments érodés sur les versants et les produits arrachés par sapement de berges.
- iii. La distribution spatiale des précipitations n'est pas uniforme en particulier dans les zones montagneuses des régions semi-arides.

Au Maroc, l'envasement des retenues des barrages a été étudié à l'aide de deux principales méthodes dont l'objectif est de déterminer le volume solide annuel déposé dans les retenues.

a. Méthode turbidimétrique :

La mesure de turbidité ou la détermination des transport solides en suspension est faite selon la méthode classique qui consiste à filtrer sur papier-filtre les échantillons d'eau prélevés et à mesurer le poids de la boue par unité de volume (1 litre) après séchage à l'étuve et élimination des matières organiques par calcination à une température de 110°C. les échantillons sont prélevés sur les bordures des oueds principaux à une profondeur variant entre 0,5 m lors des périodes d'écoulement normal, et 1 à 1,5 m durant les périodes des crues. Ainsi la charge solide mesurée représente les éléments fins et très fins véhiculés en suspension par les oueds.

D'une part, les mesures de turbidité présentent l'avantage d'être directement liées aux phénomènes hydrologiques (variation des débits liquides, étiages et crues) et météorologiques (fréquences et intensités des averses). Mais, d'autre part, elles présentent aussi des difficultés liées à la représentativité des concentrations mesurées qui ne reflètent pas l'érosion globale du bassin versant.

Les prélèvements des échantillons s'effectuent suivant des intervalles de temps variables en fonction des variations du débit :

- En période de crue, la fréquence des prélèvements est fixée pour chaque oued selon la vitesse de montée des crues. Si la montée des eaux est lente, plus d'une heure, on prélève à chaque heure un échantillon avec en plus, un prélèvement supplémentaire obligatoire au moment du maximum de la crue.
- En période de décrue, les échantillons sont sélectionnés selon la vitesse de la décrue. Un échantillon est prélevé toute heure durant les six premières heures et toutes les deux heures par la suite. L'espacement dans le temps des prélèvements croît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du maximum de la crue jusqu'à atteindre un prélèvement par jour en période d'écoulement normal et d'étiage.

Les transports solides spécifiques (TSS) sont calculés selon la formule suivante :

$$TSS = AS / S$$

où S est la superficie du bassin versant en km² et AS l'apport solide en 10³ tonnes avec :

$$AS = Q \cdot C \cdot t$$

où Q est le débit liquide en m³/s, C la concentration ou turbidité en g/l et t le temps en secondes.

b. Méthode bathymétrique :

La bathymétrie est la science qui permet de mesurer les profondeurs des océans, mais également des barrages, des lacs, des rivières, et de tout élément liquide pour déterminer la topographie du sol.

Aujourd'hui les mesures sont effectuées en exploitant la réflexion d'ondes acoustiques à l'aide des sondeurs bathymétriques . La profondeur est déduite donc de la mesure du temps du trajet d'un signal acoustique réfléchi par le fond.

L'échosondeur ou sondeur est un appareil électronique de détection subaquatique placé sous la coque des navires. Il « lit » les fonds, mesure la profondeur et détecte la présence d'obstacles ou de poissons à la verticale du bateau.

Ces informations sont généralement transmises sous la forme d'une image défilant sur un écran.

Il existe deux types de sondeurs acoustiques : les sondeurs mono-faisceau et les sondeurs multifaisceaux.

- Sondeurs acoustiques mono faisceau :

Ce sont les sondeurs les plus courants : le signal acoustique est émis vers le nadir (point situé au fond de l'eau directement sous le capteur) par un transducteur à large ouverture (typiquement plus de 30°) (fig.21) et réfléchi par le fond ; l'écho est reçu par le même transducteur. Connaissant la célérité moyenne du son dans l'eau, la mesure du temps de parcours permet d'accéder à la profondeur minimale entre l'émetteur/récepteur et le fond. Ils ne mesurent donc la profondeur des fonds qu'à la verticale du navire le long de la route suivie. La cartographie est alors réalisée à partir de bandes régulièrement espacées d'une centaine de mètres, obtenues grâce à de nombreux passages du bateau.

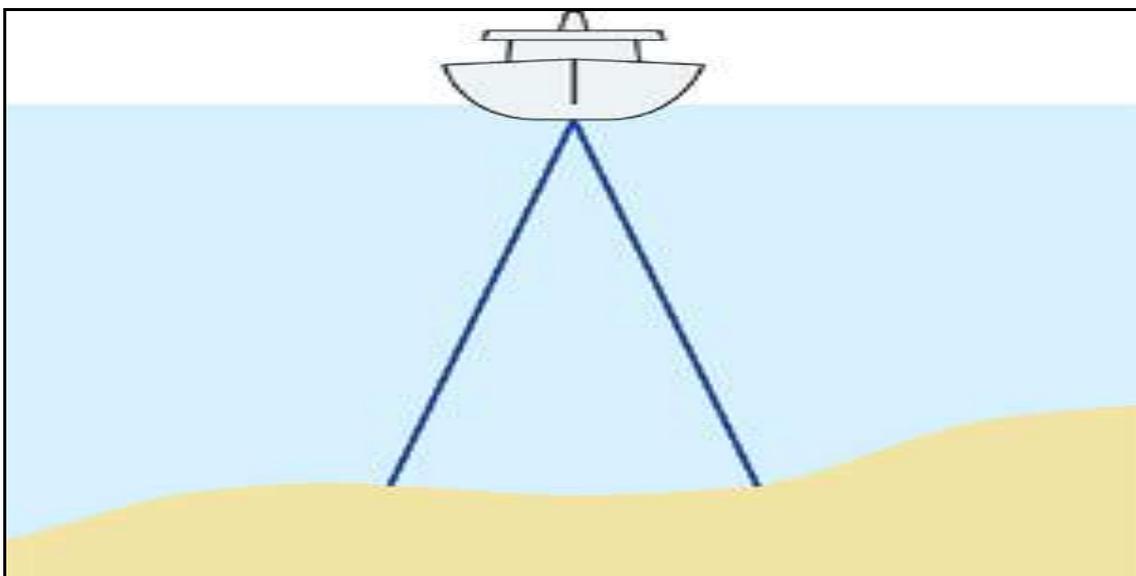


Fig.21 : Sondeur mono faisceau (angle de transmission compris entre 15° et 30°)

- Sondeurs acoustiques multifaisceaux :

Ce sont les sondeurs les plus modernes qui permettent en un seul passage de décrire la bathymétrie d'une bande pouvant atteindre plusieurs kilomètres de largeur en fonction de la profondeur. Comme leur nom l'indique, ils émettent plusieurs faisceaux (d'une dizaine à plusieurs centaines), dans plusieurs directions. L'angle couvert peut aller de 90 à 150° (fig.22).

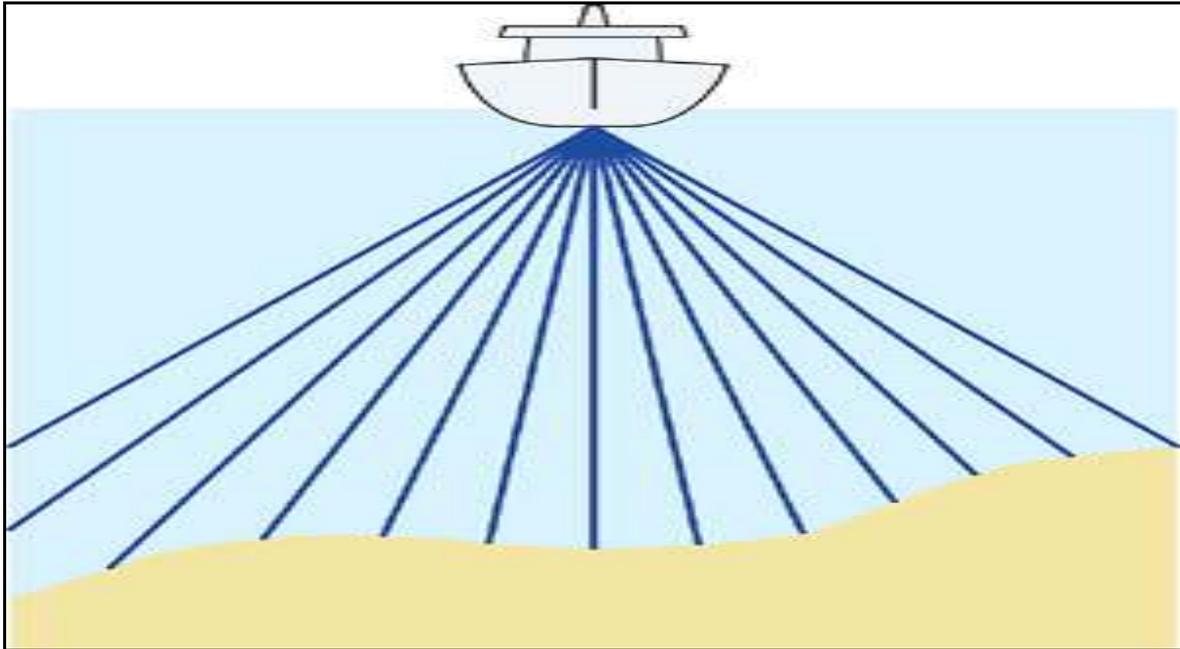


Fig.22 : Sondeur multifaisceaux (angle de transmission compris entre 90° et 150°)

Les mesures des sondeurs multifaisceaux sont d'une bien meilleure résolution. Le principe repose sur la technique des faisceaux croisés (fig.23) ; l'émission du signal sonore et la réception de l'écho réfléchi s'effectuent selon des faisceaux perpendiculaires. Les faisceaux d'émission couvrent une grande surface angulaire de chaque côté du navire (de 33° à 180°) mais une faible surface angulaire dans l'axe du navire (environ 2°). Au contraire ; les faisceaux de réception sont très étendus dans l'axe du navire (plus de 20°) et restreints latéralement (de 1° à 5°). Les surfaces sondées sont des petits carrés qui se trouvent à l'intersection entre les faisceaux d'émission et les faisceaux de réception. Cette technique a pour avantage de réduire les surfaces auparavant « invisibles » ; ce qui améliore considérablement la description des fonds.

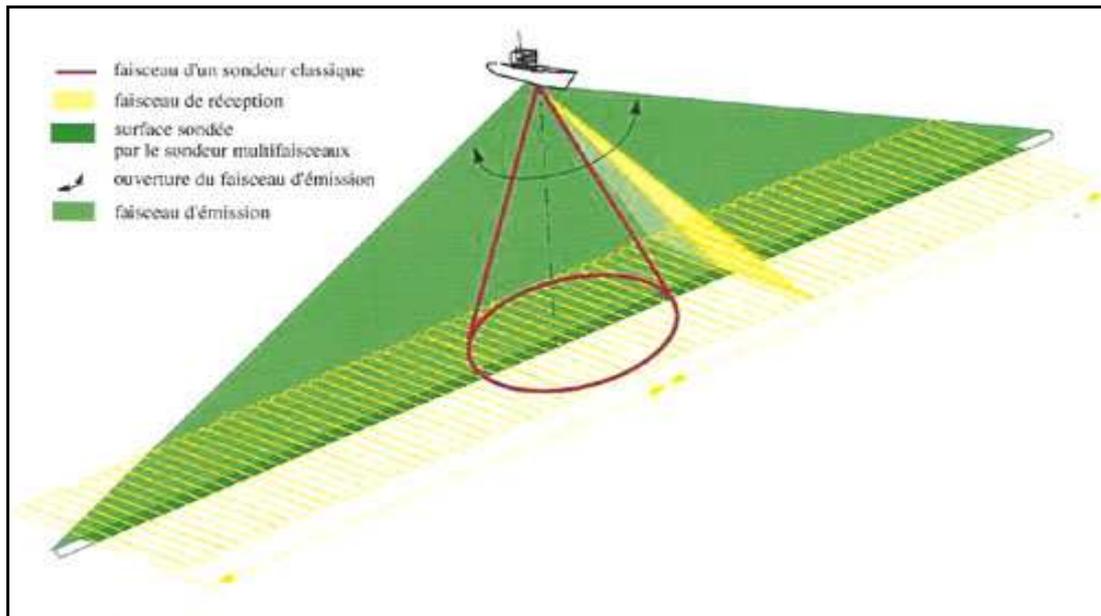


Fig.23 : Principe du sondeur multifaisceaux : technique des faisceaux croisés.

➤ **La méthodologie mise en œuvre pour calculer le taux d'envasement à partir des levés bathymétriques :**

Le levé bathymétrique consiste à établir une cartographie du fond de la retenue du barrage. Pour cela, trois mesures simultanées doivent être effectuées : la position, la profondeur et le niveau d'eau.

La mesure de la position repose sur l'utilisation d'un système de positionnement permettant de relever les coordonnées XY du système de mesure de la profondeur. De nos jours, elle est effectuée par GPS avec une précision d'ordre métrique. L'utilisation de la technique du DGPS (GPS Différentiel) permet d'accroître la précision. Il s'agit de disposer localement d'une station GPS fixe reliée au GPS mobile par ondes radios. Le différentiel entre les deux stations permet de corriger les erreurs dues aux perturbations atmosphériques et au décalage de phase des satellites pour atteindre une précision centimétrique.

La mesure de la profondeur s'effectue par sondage du fond.

La mesure du niveau d'eau permet de corriger la profondeur mesurée afin d'obtenir la topographie réelle du fond par rapport à un niveau de base. Il est généralement mesuré en même temps que les coordonnées car le GPS fournit également l'altitude.

Ces trois paramètres sont mesurés en parcourant des transects (coupe ou la dimension horizontale de l'observation) prédéfinis. L'espacement entre les transects et les points de mesures dépend de la précision désirée et des moyens disponibles. Les mesures doivent permettre de couvrir l'ensemble de la retenue.

Les données acquises doivent subir un prétraitement informatique avant leur exploitation. Les objectifs du prétraitement sont multiples :

- Eliminer les fausses sondes dues à des échos parasites ;
- Rectifier localement la position en cas de décrochage du GPS ;
- Calculer l'élévation réelle en corrigeant la profondeur par rapport au niveau d'eau.

Les données peuvent ensuite être traitées par un logiciel de SIG. Deux opérations sont possibles : premièrement la réalisation de la carte bathymétrique, pour cela les lignes isobathes sont tracées à partir des points des mesure. Deuxièmement la mise au point d'un modèle numérique de terrain (MNT). L'opération consiste à extrapoler les points de mesure afin d'obtenir des valeurs sur un maillage régulier (rectangulaire ou triangulaire). Le résultat est une couche de données pouvant être manipulé mathématiquement par le logiciel. (fig. 24)

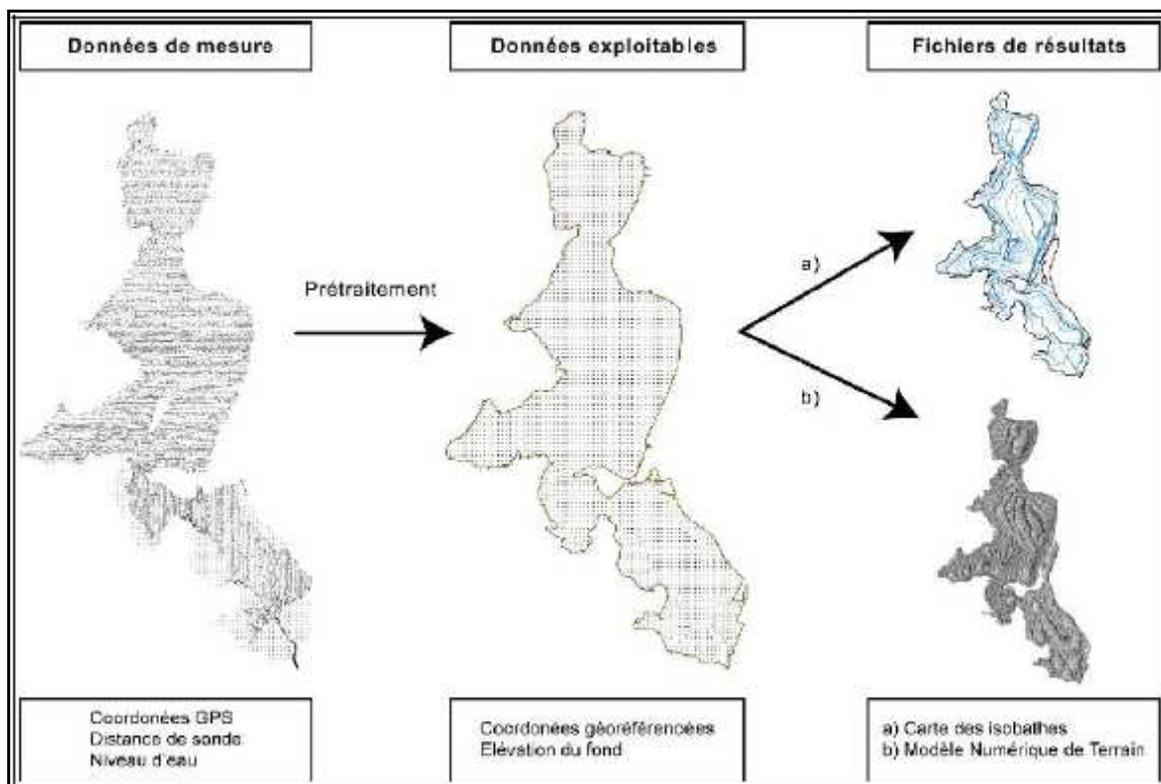
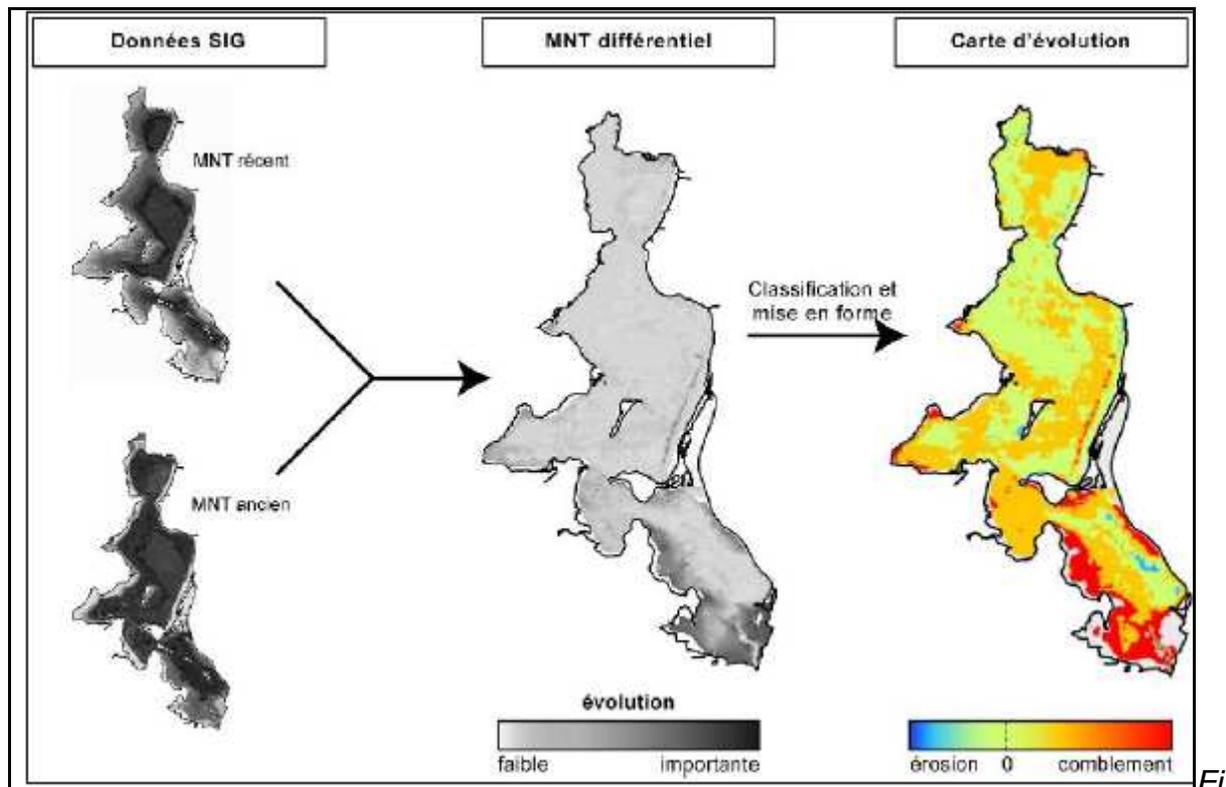


Fig.24 : Principe de traitement des données bathymétrique.

Le calcul du comblement nécessite deux relevés bathymétrique effectués à des dates distinctes, si possible avec les mêmes conditions d'acquisition (méthodologie, précision du matériel...). Les deux séries de données sont transformées en MNT puis exploitées à l'aide d'un logiciel de SIG. L'estimation du comblement passe par le calcul de la différence de profondeur pour chaque point du MNT. Cette différence peut ensuite être intégrée sur la surface pour obtenir l'évolution globale du volume de

la retenue. Elle peut aussi être représentée de façon cartographique afin de visualiser l'intensité du comblement (ou de l'érosion) pour chaque zone de la retenue. (fig. 25)



g.25 : Principe de l'analyse d'évolution bathymétrique.

3. Processus de l'envasement :

Le processus de l'envasement se déroule selon 4 étapes :



a. Erosion du bassin versant :

L'érosion hydrique correspond à la séparation entre la particule et son support, sans inclure le transport et la sédimentation, même s'il se produit toujours un micro-transport. Ce phénomène est très répandu dans les pays semi-arides et arides où la dégradation spécifique dépasse $2000t/km^2/an$.

L'érosion hydrique se développe lorsque les eaux de pluies ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol à absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol (ruissellement Hortonien),

soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation) (Bissonnais et al. 2002).

Les principaux facteurs de l'érosion hydrique sont : la pluie, la végétation, le sol, la géomorphologie (pentes en particulier) et les impacts de l'utilisation des sols par l'homme.

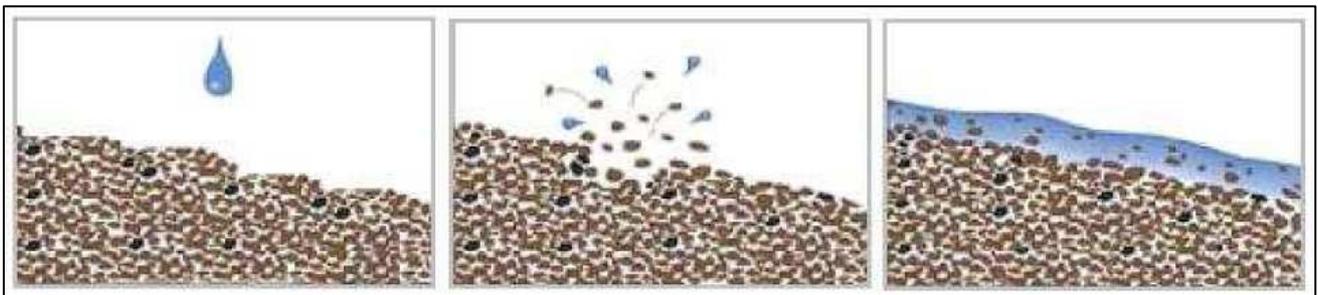
i. Différents types de l'érosion hydrique :

➤ **Erosion en nappe :**

L'érosion en nappe provoque l'enlèvement plus ou moins uniforme d'une mince couche ou « nappe » de sol. Car l'énergie des gouttes de pluie s'applique à toute la surface du sol et le transport des matériaux détachés s'effectue par le ruissellement en nappe. C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion.

L'érosion en nappe s'effectue selon deux étapes : (fig.26)

- le détachement des particules de terre causé par le choc des gouttes de pluies : effet splash.
- le ruissellement superficiel lorsque l'intensité de la pluie



devient supérieure à la vitesse d'infiltration : ruissellement hortonien.

Fig.26 : Erosion en nappe : (a-sol sec, b-effet splash, c-ruissellement hortonien).

➤ **Erosion linéaire :**

On parle de l'érosion linéaire lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol. D'abord il se forme des flaques, ensuite ces flaques communiquent par des filets d'eaux et lorsque ces filets d'eaux atteignent une certaine vitesse, 50 cm/s selon Hjulstrom (1935), ils acquièrent une énergie propre qui va créer une érosion limitée dans l'espace au niveau de lignes d'écoulement (fig.27). Lorsque le ruissellement est ainsi concentré, la vitesse augmente, l'érosion n'est plus sélective et creuse des rigoles et des ravines (Roose, 1994).

L'érosion linéaire provoque donc un décapage total de l'horizon humifère et de l'ensemble des matériaux meubles sur la largeur concerné par les cours d'eau. On parle de griffes, lorsque les petits canaux ont quelques cm de profondeurs, de rigoles, lorsque les canaux dépassent 10 cm et de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 50cm) (Roose 1994).

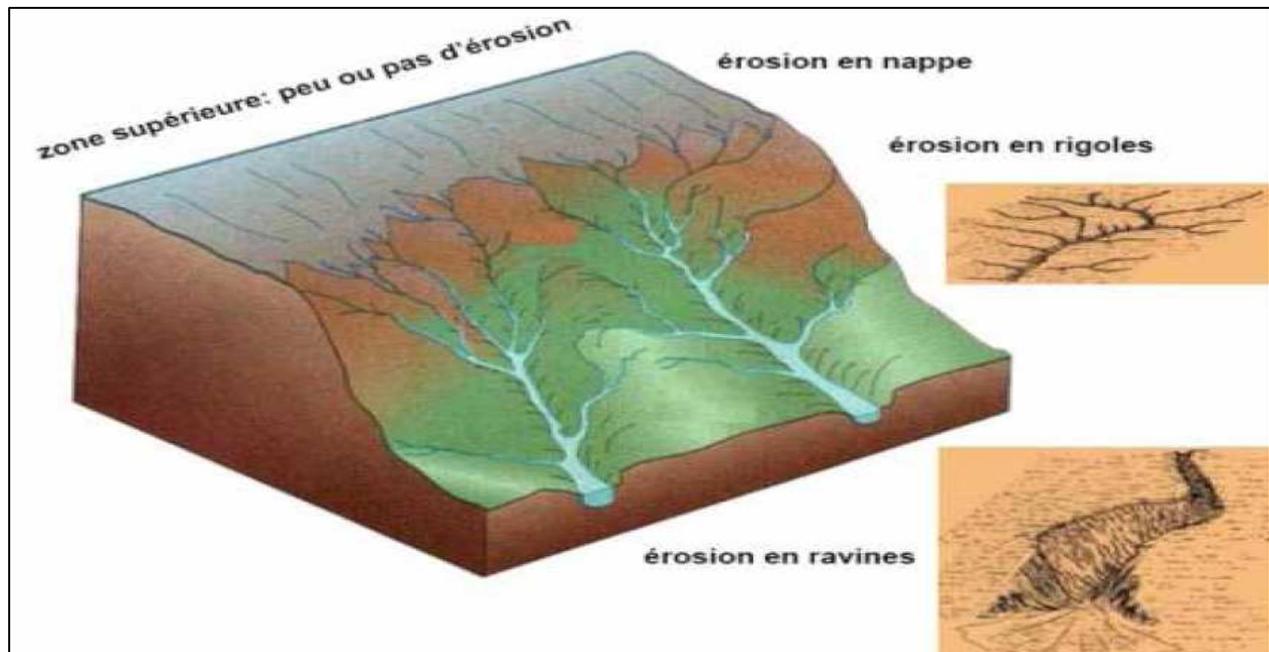


Fig.27 : Erosion linéaire.

➤ **Erosion en masse :**

L'érosion en masse concerne des mouvements à l'intérieur de la couverture pédologique. Les phénomènes de mouvements de masse sont très nombreux mais on peut les regrouper en six groupes principaux : (Roose, 1994).

▪ **Les glissements lents (creeping) :**

C'est un glissement plus ou moins lent des couches superficielles de la couverture pédologique, généralement sans décollement, qui s'observe sur les pentes fortes et qui est mis en évidence par des repères à la surface ; tels que la forme couchée des jeunes plantes forestières et la forme en crosse de la base des arbres adultes (fig.28).

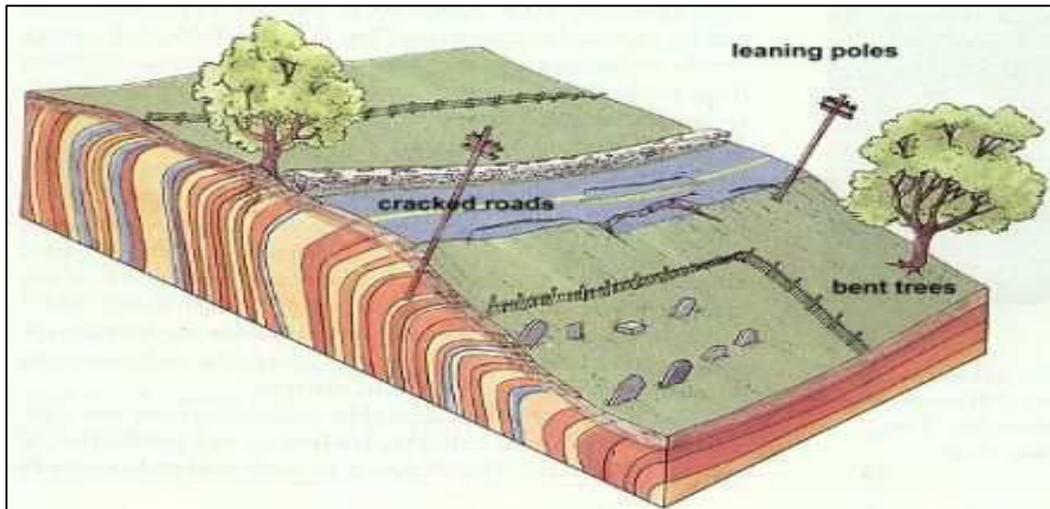


Fig.28: Glissements lents.

▪ **Les glissements rapides :**

Les glissements de terrain en planches sont des décollements d'une couche plus ou moins épaisse du sol, glissant sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée), servant de plans de glissement.(fig.29)

Ce phénomène est très courant sur les schistes dont le pendage est parallèle à la topographié (pendage conforme), sur les gneiss et sur les marnes en voie d'altération, tel est le cas dans le bassin versant du N'Fis



Fig.29 : Schéma expliquant le phénomène du glissement en planche.

- ***Les versants moutonnés :***

Ce sont des formes molles qui apparaissent dans les conditions humides lorsque les horizons superficiels dépassent le point de plasticité et progressent lentement comme une pâte dentifrice, entre la trame de racines qui retient l'horizon de surface et l'horizon compact imperméable que représente l'altérite des marnes ou des argilites par exemple.

- ***Les coulées boueuses :***

Ce sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité, qui emportent à grande vitesse(jusqu'à 80km/h) des masses considérables de boue et de blocs de roches de taille imposante. Lorsqu'elles viennent de se produire, elles se présentent sous forme d'un canal terminé par une langue de matériaux de texture très hétérogène nommée cône de déjection. Les matériaux fins sont repris ultérieurement par l'érosion hydrique en nappe ou en rigole, laissant en place une masse de cailloux et de blocs de taille très hétérogène. (fig.30).



Fig.30 : Charge solide laissée par la crue du 17/08/1995 (vallée de l'Ourika).

Elles apparaissent souvent à la suite d'un glissement en planche ou dans une ravine lors d'une averse exceptionnelle nettoyant les altérites accumulées depuis quelques années (Temple et Rapp, 1972).

▪ **Les glissements rotationnels en « coups de cuillère » :**

Ce sont des glissements où la surface du sol et une partie de la masse glissent en faisant une rotation, de telle sorte qu'il apparait une contrepenne sur le versant. Il s'agit souvent de toute une série de coups de cuillère, laissant au paysage un aspect moutonné.

Au creux du coup de cuillère, on observe généralement une zone humide où croit une végétation adaptée à l'hydromorphie (Carex). Il arrive couramment qu'après des périodes très humides, il s'installe un ruissellement sur les bords de la contrepenne qui fait progressivement disparaître la contrepenne, ne laissant qu'un creux dans le versant qu'il est difficile de dissocier d'un ravinement ordinaire (fig.31).

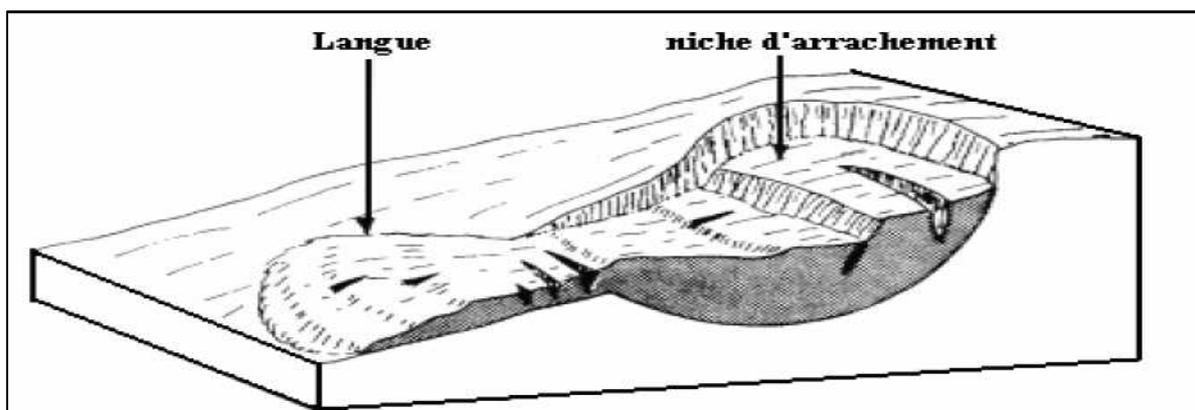


Fig.31 : Glissement rotationnel en coup de cuillère.

▪ **Les formes locales :**

Il s'agit d'éboulements rocheux, de sapements de berges ou d'effondrement de versants qui entraînent des glissements localisés. Ceux-ci sont très fréquents en tête de ravine : ils entraînent l'éboulement de la partie supérieure des lèvres d'une ravine et font progresser la ravine vers le sommet de la colline par érosion régressive. On les trouve également dans les oueds, en particulier dans les parties concaves de la rivière lorsqu'elle forme un méandre.

ii. **Conséquences de l'érosion hydrique en zones érodées et en zones de dépôts :**

➤ **Conséquences de l'érosion hydrique en zones érodées :**

L'érosion hydrique a des effets sur les zones érodées, parmi lesquels on cite :

- La diminution de la capacité du sol de retenir l'eau et de mettre à la disposition des végétaux ;

- La diminution du drainage profond induisant une moindre réalimentation des nappes ;
- L'appauvrissement du sol : la teneur en humus et en élément nutritifs du sol décroît ce qui influence la stabilité structurale du sol ;
- La baisse des rendements des cultures, une augmentation des coûts de production des aliments (FAO,1983) ;
- La dégradation des terres agricoles et une désertification du milieu naturel (FAO, 1980).

➤ **Conséquences de l'érosion hydrique en zones de dépôts :**

- L'envasement accéléré des barrages, des canaux d'irrigation et des réservoirs ;
- La destruction de routes, chemins et ponts ;
- La réduction de la capacité des lits de rivières et un risque d'inondation des terres voisines ;
- Le transfert et la répartition spatiale des polluants (pesticides, métaux lourds et nutriments en excès) dans l'environnement ;
- L'augmentation du coût de traitement des eaux de consommation.

b. Transport solide :

Une fois les matériaux érodés arrivés dans les cours d'eau, ils seront transportés par la force du courant.

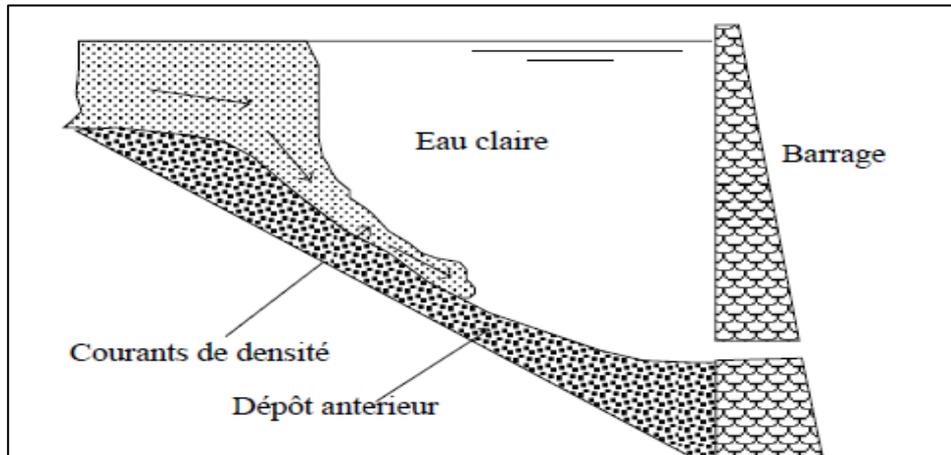
Les concentrations des sédiments transportés sont fonction des cours d'eau et de l'importance des crues.

c. Piégeage des sédiments et comblement des retenus :

Une fois la crue arrivée au niveau des eaux calmes du réservoir, les matériaux grossiers se déposent dans la zone de remous en formant un « delta » en queue de la retenue.

Les particules fines sont piégées dans la retenue et commencent à se déposer, se tasser et à se consolider diminuant ainsi progressivement leur capacité de stockage en eau.

Lorsque la concentration des sédiments est très élevée, les particules fines plongent au fond de la retenue et s'y écoulent sous forme d'un courant de densité (fig.32). si la configuration géométrique des retenues est sous forme de canal (c'est le cas pour la plupart des retenues de l'Afrique du nord), les courants de densité vont se propager



jusqu'au pied du barrage.

Fig.32 : Propagation du courant de densité (Remini,2003).

En l'absence d'ouverture des vannes, les sédiments drainés par les courants de densité se déposent et se tassent puis se compactent selon leur nature. Cette consolidation peut gêner, plus tard, l'évacuation des sédiments accumulés dans la cuvette lorsque les manœuvres des vannes seront opérées plus tard.

I. L'ENVASEMENT DANS LES PAYS DU MAGHREB : (COMPARAISON ENTRE LE MAROC, L'ALGERIE ET LA TUNISIE) :

➤ Généralités sur l'envasement dans les pays du Maghreb :

La sédimentation dans les retenues de barrages des pays du Maghreb est très élevée, elle est due directement aux forts taux d'érosion des bassins versants favorisées par la situation de ces pays dans une zone montagneuse caractérisée par un climat agressif avec l'alternance des années sèches et humides.

Les pays du Maghreb disposent de plus de 230 barrages d'une capacité totale de stockage de 23 milliards de m³ repartis comme le montre la figure 33.

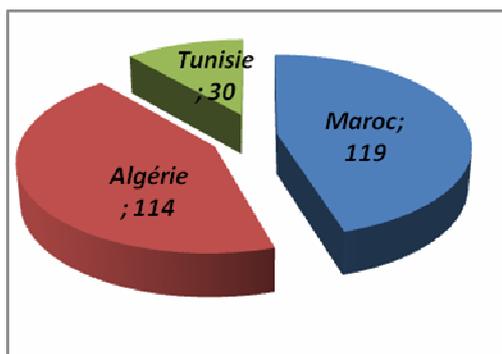


Fig.33 a : Nombre de barrages .

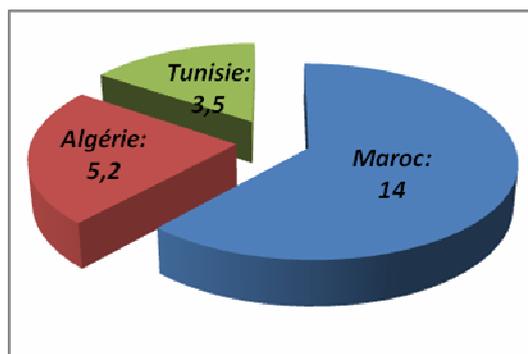


Fig.33 b : Capacité de stockage (milliards de m³).

Le suivi de l'envasement des retenues a permis d'évaluer à près de $125.10^6 m^3$ la capacité perdue par envasement en moyenne chaque année (W.Remini, B.Remini, 2003). La figure 34 montre la répartition de cette capacité entre les 3 pays.

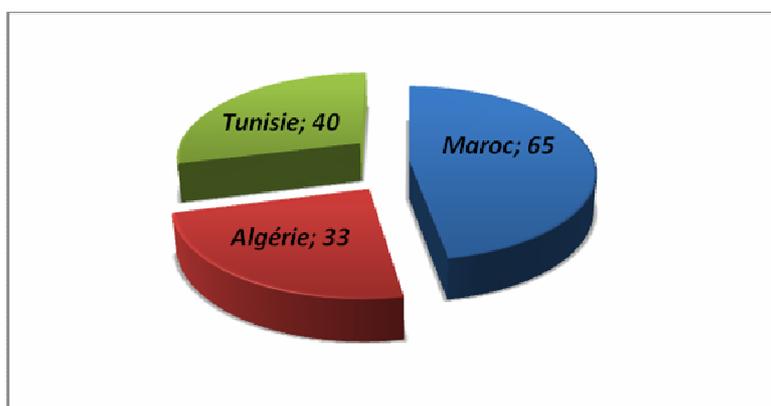


Fig.34 : Envasement moyen annuel (millions de m³).

La majorité des bassins versants du Maroc, de l'Algérie et de la Tunisie est caractérisée par de fortes dégradations spécifiques dépassant $2000t/km^2/an$.

A titre d'exemple, dans les bassins versants du Maroc, le taux de l'érosion spécifique est :

- Supérieur à $2000t/km^2/an$ au niveau des bassins du Martil, de l'Ouergha, de l'Akhdar, et de Tessaout.
- Comprise entre 1000 et $2000t/km^2/an$ au niveau des bassins du Neckor, de M'Harhar, et du Loukkos.
- Comprise entre 500 et $1000t/km^2/an$ au niveau des bassins de Sebou, de l'Inanouène, de l'oued El Abid, et du Massa.
- Inférieur à $500t/km^2/an$ dans le reste du pays. (W. Remini, B.Remini, 2001).

D'autre part, les concentrations en sédiments dans ces pays sont très élevées et peuvent atteindre ou même dépasser les 200g/l en Tunisie. Des quantités considérables de sédiments sont observées en Algérie (50 à 150g/l), avec des valeurs maximales dépassant même 500 et 600g/l. Une proportion importante de ces sédiments est piégée dans les retenues. Au Maroc près de 60% des 100.10⁶ de tonnes de terre érodée annuellement se déposent dans les retenues des barrages.

➤ **Conséquences de l'envasement : cas des pays du Maghreb :**

La sédimentation dans les retenues des barrages pose d'énormes problèmes à savoir :

• **La réduction de la capacité de stockage du barrage :**

Cette réduction de la capacité de stockage de l'eau est sans doute la conséquence la plus dramatique de l'envasement.

On va prendre l'exemple d'une dizaine de barrages les plus envasés du pays du Maghreb. Le tableau 8 représente le taux de sédimentation dans ces barrages :

barrages		Année de mise en service	Capacité (10 ⁶ m ³)	Envasement moyen annuel (10 ⁶ m ³ /an)	Taux de sédimentation (%)
Maroc	Mohamed V	1967	725	11,6	56
	Mansour Edahbi	1972	592	4,8	24
	El Massira	1979	2724	9	7,5
	Bir El Ouidane	1953	1484	4,5	15
Algérie	Ghrid	1939	280	3,2	72
	Oued El Fodda	1932	228	2,31	71
	Ighil Imda	1953	155	1,33	42
	Boughezoul	1934	55	0,66	81
Tunisie	Mellegue	1954	332	5,94	85
	Sidi Salem	1981	555	5,6	21

Tab.8 : Comparaison entre les dix barrages les plus envasés du pays du Maghreb.

Le tableau numéro 7 montre que le barrage Mohamed V est le premier barrage affecté par l'envasement en pays du Maghreb, il reçoit annuellement un volume de vase de 11,6 10⁶m³.

Les quatre barrages marocains reçoivent annuellement une quantité de vase égal à 30.10⁶m³, l'équivalent de ce que les 114 barrages algériens reçoivent annuellement.

L'interprétation scientifique de ces chiffres est que l'envasement dans le Maroc est trop élevé, en comparaison avec ce qui est observé en Algérie et en Tunisie. Et d'ailleurs d'après l'Organisation Islamique pour l'Education, les Sciences et la

Culture (ISESCO 2010) : l'alluvionnement de tous les barrages marocains depuis leur exploitation s'élève à 800 Mm³ soit 8% de la capacité totale initiale, tandis que l'envasement total de tous les barrages algériens est estimée à 460 Mm³ (11 % de la capacité totale initiale), et l'atterrissement total de sédiments dans tous les réservoirs tunisiens, depuis leur création, est de 270 Mm³ soit 13 % de la capacité totale initiale. Mais si on compare ces pertes avec le nombre des barrages, la capacité du stockage ainsi que la superficie des bassins versant des trois pays on constate que le Maroc est le pays dont les barrages sont le moins affecté par l'envasement.

- ***Le blocage des organes de vidange :***

Un autre danger représenté par l'envasement est celui du blocage et de l'obturation des organes de vidange. A titre d'exemple, on peut citer le cas du barrage algérien de l'oued El Fodda dont la vanne de fond a été bloquée depuis 1948 suite à la consolidation rapide de la vase. Actuellement, elle se trouve sous plus de 40m de hauteur de vase.

- ***L'accélération de l'eutrophisation de la retenue :***

L'eutrophisation est la modification et la dégradation d'un milieu aquatique, lié en général à un apport excessif de substances nutritives, qui augmentent la production d'algues et d'espèces aquatiques.

Ce processus a comme principales origines :

des épandages agricoles excessivement riches en engrais (azote et phosphore)

des rejets industriels ou urbains riches en nitrates, ammonium, matière organique non traitée, la présence de poly phosphates dans les lessives font de l'eutrophisation un processus fréquent, pouvant provoquer l'extension de zones mortes, ou le développement d'algues toxiques

L'eutrophisation est donc souvent synonyme de pollution, qui peut provoquer une dégradation rapide des lacs surtout en aval des zones fortement urbanisée.

- ***La sédimentation des canaux d'irrigation :***

Un autre problème délicat posé par l'envasement qui s'étend cette fois-ci à l'aval du barrage. En effet dans les pays arides et semi-arides, l'irrigation se fait généralement par de l'eau chargée en sédiments, c'est ainsi que ces particules fines vont se déposer dans les canaux, réduisant leurs section mouillées et bien sur le débit d'eau

véhiculée. Ce problème impose leur entretien, et leur dévasement d'une manière périodique.

Au Maroc, selon Badraoui et Hajji (2001), plusieurs canaux d'irrigation s'engorgent à chaque opération d'irrigation. C'est le cas du canal de rocade qui alimente les périmètres du Haouz central, et la ville de Marrakech à partir du complexe Hassan I Sidi Driss.

- **La sécurité de l'ouvrage :**

Indépendamment du problème de la diminution de la capacité du réservoir, l'engorgement pose celui de la stabilité de l'ouvrage. En effet, l'accumulation de quantités importantes de vases au pied de la retenue du barrage est à l'origine d'une perturbation des conditions de stabilité de ce dernier. A titre d'exemple on prend le cas du barrage algérien des Zardezas, les services concernés ont diminué le volume de l'eau claire de $9.10^6 m^3$ en 1990 pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

I. CAS DU BARRAGE TAKERKOUST :

1. Situation et caractéristiques générales du barrage :

Le barrage de Lalla Takerkoust dont le but est d'accumuler un volume de $54 Mm^3$, d'irriguer un périmètre de 5000ha de terres agricoles et de produire 12 M KWh d'énergie hydroélectrique, est mis en service en 1935 sur l'oued N'Fis à environ 35km au Sud Est de Marrakech. Ces coordonnées Lambert sont : X=239.000km, Y=97.500km, Z=665.60NGM. (fig.35).

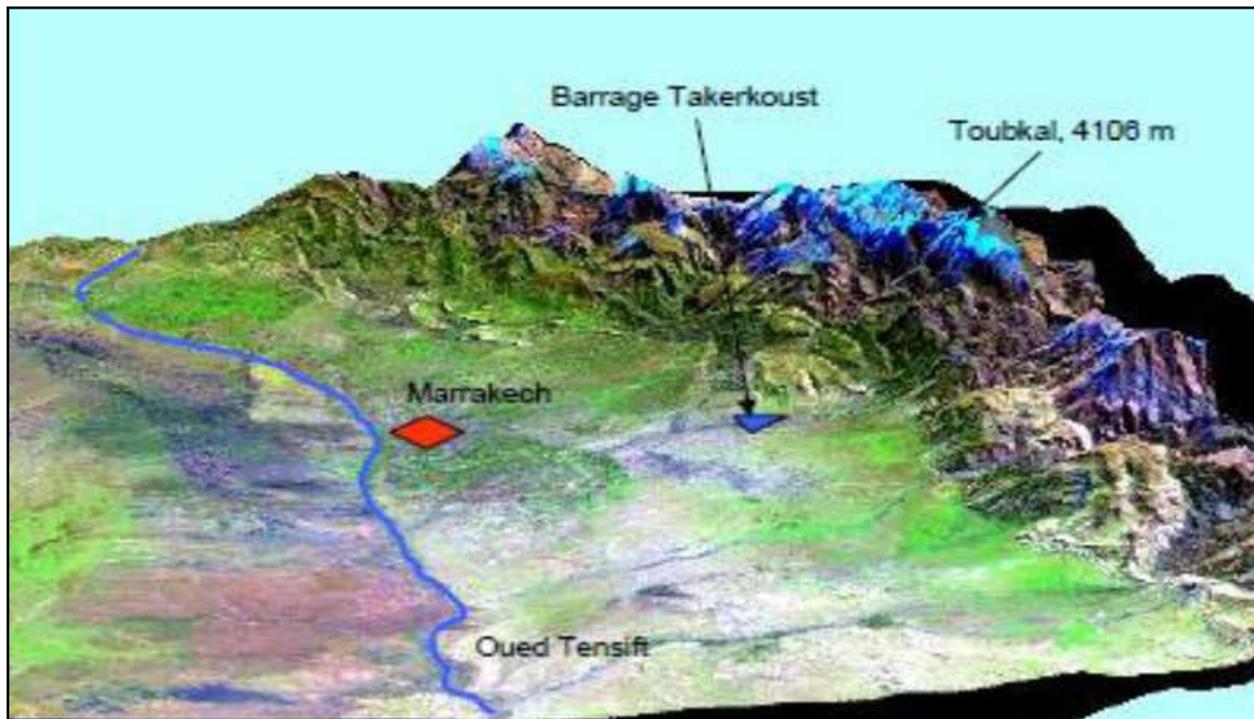


Fig.35: Situation géographique du barrage de Takerkoust.

Il s'agit d'un barrage poids en béton dont sa propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau (fig.36). Il comprend 28 plots de 12m de longueur qui sont indépendants les uns des autres.

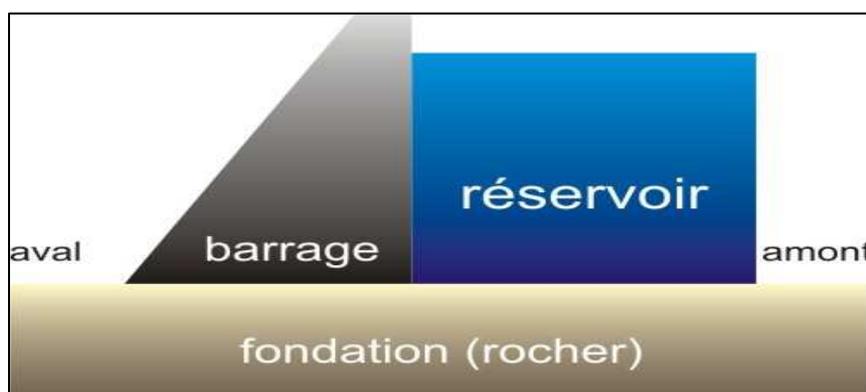


Fig.36 : Structure d'un barrage poids en béton.

Comme tous les barrages, le barrage de Lalla TAKERKOUST est accompagné des ouvrages annexes qui sont indispensables à son bon fonctionnement. Ces ouvrages comportent : (fig.37)

- **Evacuateurs de crue :**

Ils sont constitués de 4 vannes de surface de 15m de largeur destinées à déverser les grosse crues. Le débit maximal de déversement est de l'ordre de 2060 m³/s et la cote de déversement est de 657,9NGM.

- **Prises d'eau :**

Ces dispositifs sont destinés à prélever de l'eau dans la retenue du barrage pour différents besoins : irrigation, alimentation en eau potable, fonctionnement des usines hydroélectriques, besoins industriels. Pour ce barrage, le débit maximal à prélever est de 26m³/s.

- **Vidange de fond :**

Elle est équipée de l'amont à l'aval d'une vanne de garde et une vanne de réglage. La cote limite de la prise est de 605,8NGM et le débit maximal est 26m³/s. La vidange est placée au fond de la retenue et joue un rôle dans :

- La vidange de la retenue pour la surveillance.
- L'entretien et la répartition du barrage et de ses ouvrages annexes.
- Le remplacement de la prise d'eau pour permettre la répartition de celle-ci en cas de défaillance.

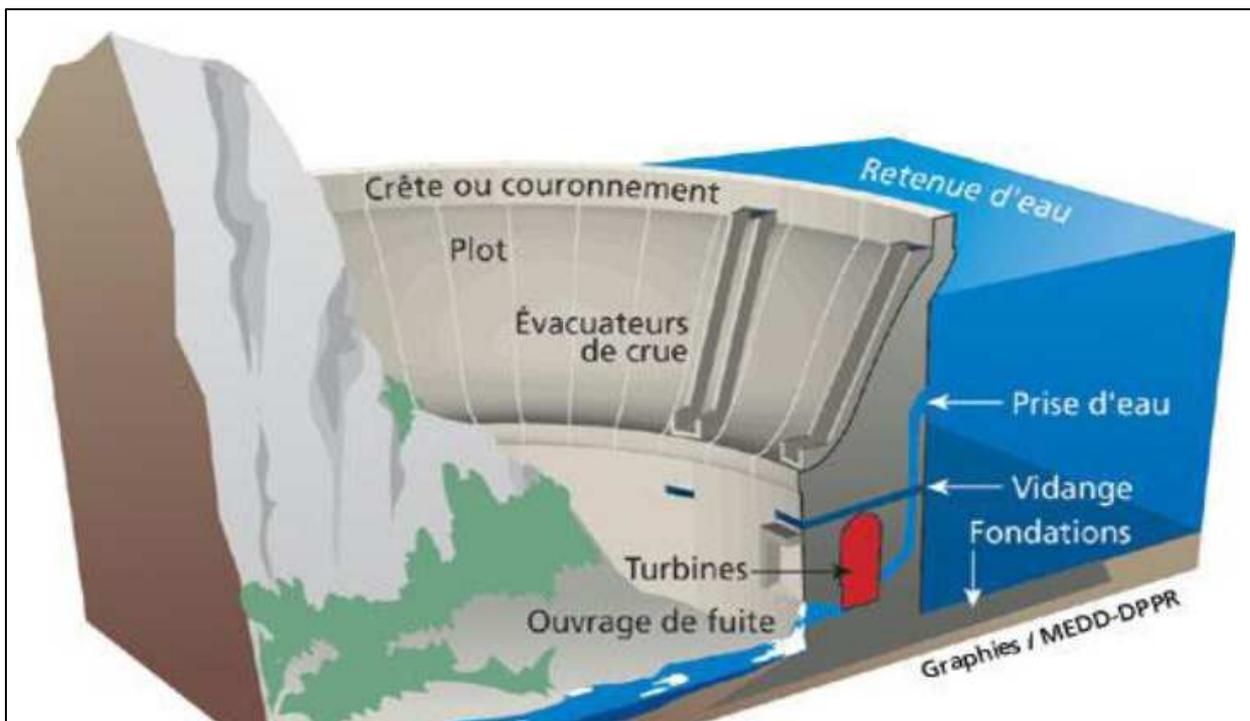


Fig.37 : Ouvrages annexes d'un barrage.

Le barrage de lalla Takerkoust a été surélevé de 9m en 1980 après une diminution de son volume de 20Mm^3 (sa capacité en 1975 est de $34,4\text{Mm}^3$), soit une perte annuelle de $0,5\text{Mm}^3$ causée par l'envasement intensif qu'a connu ce barrage. Cette surélévation a permis d'augmenter la capacité de stockage en eau à $78,7\text{Mm}^3$, et de porter la superficie irriguée à 9800ha et la production moyenne annuelle d'énergie électrique à 15 millions de KWh.

Conclusion :

Le tableau 9 résume les caractéristiques de la retenue et du barrage de Takerkoust :

caractéristiques

<i>Barrage</i>	- Cote crête (NGM)	665,6
	- Hauteur sur fondation (m)	71
	- Longueur (m)	500
	- Volume du béton (10^3m^3)	200
<i>retenue</i>	- Cote normale (NGM)	664,6
	- Volume actuel (10^6m^3)	53,6
	- Longueur (m)	7000
	- Largeur (m)	1000
	- Superficie (km^2)	6

Tab.9 : Caractéristiques du barrage de Lalla Takerkoust (source : ABHT)

2. Etude de sédimentation de Takerkoust et estimation de la dégradation spécifique du bassin du N'Fis :

Les données des levés bathymétriques ont été fournies par la direction provinciale d'agriculture de Marrakech, elles couvrent une période de 23 ans (1981-2004).

L'analyse de ces données nous a permis d'établir le tableau 9 ci-dessous :

<i>Année</i>	<i>période</i>	<i>Volume de la retenue à la cote normale (Mm^3)</i>	<i>Volume d'envasement (Mm^3)</i>	<i>Volume d'envasement (tonne)</i>	<i>Dégradation spécifique correspondante (t/km^2)</i>	<i>Taux d'envasement (%)</i>
1981	-	72,5	-	-	-	-
1982	1981-82	70	2,5	$2,5 \cdot 10^6$	1464,56	5
1988	1982-88	68,9	1,1	$1,1 \cdot 10^6$	644,40	3,4
1999	1988-99	60,7	8,2	$8,4 \cdot 10^6$	4803,75	16,3
2002	1999-02	56,1	4,6	$4,6 \cdot 10^6$	2694,80	22,6
2004	2002-04	53,6	2,5	$2,5 \cdot 10^6$	1464,56	23
total	23 ans		18,9	$18,9 \cdot 10^6$	11072,07	70,3

Tab.9 : Résultat des levés bathymétriques de la retenue de Takerkoust durant la période 1981-2004.

Le tableau montre que le volume total de dépôt solide dans la retenue du barrage de Lalla Takerkoust à la cote normale (664,6NGM) est de l'ordre de $18,9Mm^3$, correspondant à un dépôt moyen annuel de $0,8Mm^3/an$. Tandis que, les campagnes de mesures bathymétriques réalisées avant la surélévation du barrage (1936-1975) ont montré que la retenue a connu un envasement moyen de $0,5Mm^3/an$, ce qui indique une augmentation de l'envasement.

La dégradation spécifique correspondante pour une superficie du bassin versant de $1707Km^2$ est de $481,4t/km^2/an$. Elle reste faible par rapport aux autres bassins du Haut Atlas ; par exemple la dégradation spécifique dans le bassin de R'Dat pour une

superficie de 569km² est de 3015t/km²/an et dans le bassin de Ksob pour une superficie de 1733km² est de 1000t/km²/an. (d'après l'ABHT).

La période 1988-1999 a connue le volume d'envasement le plus élevé (8,2 Mm³) ce qui est peut être expliquer par le nombres des crues enregistré durant cette période qui est de 12- à raison d'une crue par an- dont deux sont les plus élevés qu'a connu le bassin du N'Fis : la crue du 05/11/1988 avec un débit de pointe de 1220m³/s, et la crue du 28/10/1999 avec un débit de 1575m³/s (Annexe 4). Tandis que le volume le plus bas (1,1 Mm³) est celui enregistré en 1982-1988 et qui peut être expliquer par la sécheresse qu'a connu le Maroc durant cette période.

La figure 38 montre l'évolution du volume de la retenue du barrage de lalla Takerkoust ainsi que le taux d'envasement de 1981 à 2004.

Durant une période de 23 ans, le barrage de lalla Takerkoust a connu une diminution de son volume de stockage de 18,9 Mm³ et en parallèle une augmentation du taux de sédimentation qui atteint les 23% en 2004.

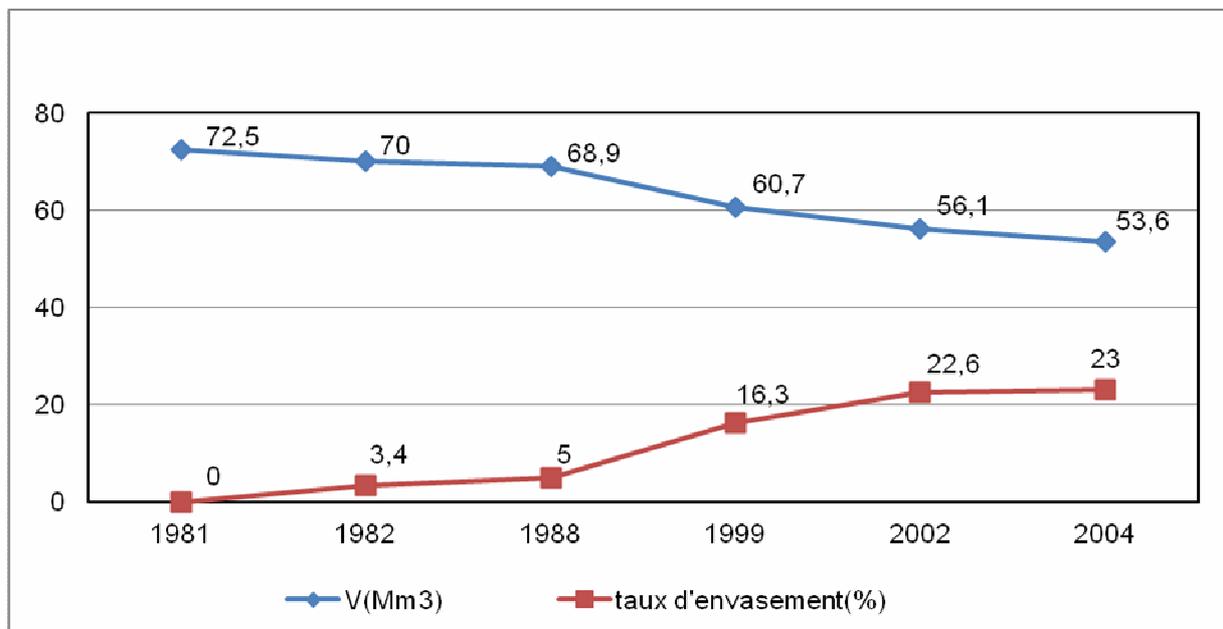


Fig.38 : Evolution du volume de la retenue et du taux d'envasement dans la retenue du barrage de lalla Takerkoust.

3. Comparaison avec les grands barrages du Maroc :

Chaque année l'envasement diminue la capacité totale des infrastructures hydrauliques nationales. Ces pertes de capacité sont estimées à 50Mm³/an (quantité d'eau nécessaire pour irriguer 6000ha), soit une diminution de 0,5% par an. Le volume total envasé est évalué à près de 830Mm³, ce qui représente près de 8% de la capacité totale des barrages.

Le tableau 10 ci-dessous donne une comparaison entre les 22 grands barrages du Maroc classés selon l'importance de leur envasement moyen annuel.

Nom du barrage	Capacité de la retenue Mm ³	Superficie du BV(km ²)	Envasement moyen annuel Mm ³ /an an	Dégradation spécifique t/ha/an	Superficie à risque total %	Pertes aval Mds	Pertes amont Mds	Total pertes Mds
Al Wahda	3730	6153	18,5	20	83	0	1462	1462
Mohamed V	465	49920	10	3	83	1185	630	1815
Bin El Ouidane	1300	6400	5	11,72	83	0	549	549
Mansour Dahi	505	15000	4,7	4,7	85	169	221	390
Oued El Makhazine	722	1820	4,6	37,91	76	103	627	730
Hassan I	254	1670	2,9	26	71	145	607	752
Moulay Youssef	175	1441	2,6	27,06	75	281	454	735
Al Massera	2474	28500	2,5	1,32	66	0	118	118
Idriss I	1173	3680	2,2	8,97	87	0	659	659
Aoulouz	100	4500	2,1	3,2	-	49	78	127
Sidi M.B.Abdellah	477	9800	1,7	2,6	50	0	258	258
Youssef Ben Tachfine	303	3784	1,43	8,32	85	41	147	188
El Kansera	265	4540	1,4	4,63	87	108	478	586
Med Ben A Khattabi	34	780	1,3	25	80	118	198	316
Allal El Fassi	81	5765	1,2	20	50	0	629	629
Hassan Eddakhil	343	4400	1,17	3,99	85	34	79	113
Ibn Batouta	36	178	0,56	47,19	60	80	33	113
Lalla Takerkoust	68	1707	0,5	4,39	81	39	254	293
Nakhla	6	107	0,3	42,06	71	65	35	100
Abdlmoumen	213	1300	0,23	2,65	75	0	55	55
Melleh	8	1800	0,15	0	5	12	0	12
Total			65,54	331,21		2429	7619	10048

Tab.10 : Comparaison entre les 22 grand barrages du Maroc (Source : ministre de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement (état en 1999))

Le tableau comparatif montre que :

- Le volume total de dépôt solide dans l'ensemble des retenues est de l'ordre de 65,54Mm³/an, la dégradation correspondante est de 331,21t/ha/an. l'envasement moyen annuel varie entre une valeur maximale de 18,5Mm³ enregistré dans la retenue du barrage Al Wahda, et une valeur minimale de 0,15Mm³ au niveau du barrage de Melleh. Le barrage de lalla Takerkoust occupe le 19^{ème} ordre avec 0,5Mm³/an.
- Les pertes totales dans l'ensemble des barrages est de l'ordre de 10048Mdh avec une priorité au barrage Mohamed V (1815Mdh). Le barrage de Takerkoust arrive en 12^{ème} ordre avec une perte totale de 293Mdh.

Ces données illustrent l'importance que revêt la lutte contre l'envasement pour permettre une exploitation durable de ces ouvrages hydrauliques.

1. Traitement antiérosif réalisé au niveau du bassin versant du N'Fis durant la période 2005-2010 et prévision par projet durant la période 2011- 2013 :

2. Généralités sur l'aménagement des bassins versants :

Les traitements antiérosifs jouent un rôle primordial dans la réduction de l'érosion à sa source, et donc du transport solide et de l'envasement des retenues des barrages.

Les traitements antiérosifs peuvent être de deux catégories :

b. Les traitements biologiques à long terme :

Les traitements biologiques ou les reboisements soit de protection ou de production jouent un rôle important dans la domestication de l'eau à l'instant où la goutte de pluie tombe sur le sol notamment par leur feuilles et leur racines.

Les espèces de reboisements les plus utilisées au Maroc sont : le pin, le cèdre, le cyprès, le thuya, les acacias, le chêne-liège, le peuplier et les arbustes fourragers.... Une priorité est cependant accordée aux essences autochtones pour la reconstitution des forêts naturelles (cèdre, chêne-liège...).

Ces traitements présentent un inconvénient majeur résidant dans le fait que leur pleine efficacité ne peut être immédiate et peut porter sur plusieurs années.

b. Les traitements mécaniques à court et moyen terme :

Ils jouent un rôle de la domestication de l'eau dès qu'elle commence à courir, au niveau des exploitations agricoles. En voici quelques exemples de mesures de lutte les plus utilisées et qui vont être traités de la façon suivante :

vi. Amélioration de la structure du sol :

Avant toute réalisation d'ouvrage, il faut d'abord améliorer la structure du sol grâce à des amendements humifères, des amendements calcaires qui stabilisent les complexes argilo-humiques et par des bonnes pratiques de gestion.

vii. Création d'obstacles au ruissellement :

Banquettes : Ce sont des levées de terre de faible hauteur (0.50 m) établies selon les courbes de niveau; elles sont généralement plantées par des arbres permettant de valoriser les surfaces marginales, de fixer les ouvrages et améliorer l'infiltration. sont des petites terrasses horizontales, perpendiculaires à la ligne de la plus grande pente, La largeur de la terrasse varie entre 0.5 et 2.5 mètres. S'il s'agit d'éléments de



Banquettes continues avec des plantations forestières

Banquettes continues avec des oliviers



banquette, la longueur est comprise entre 4 et 10 mètres. (fig.39)

Fig.39 : Plantations fruitières et forestières sur banquettes.

Levés de terre: ce sont des banquettes plus importantes (jusqu'à 1,80 m de hauteur); elles sont plantées d'arbres.

Terrasses : On les trouve sur les versants et dans les fonds des vallées, entre les lits des oueds et le début des fortes pentes. La construction se fait sur les sols profonds afin d'éviter d'aller dans la roche mère. Il n'est pas recommandé de les construire sur les pentes faibles (10 %) du fait de leur coût prohibitif. On peut distinguer deux types de terrasses: les terrasses qui sont soutenues par des murs en pierres sèches et celles qui sont soutenues par le talus.

La technique des terrasses soutenues par des murs s'applique aux pentes moyennes à fortes, où la charge caillouteuse est importante. Les murs sont alignés suivant les courbes de niveau et leur espacement augmente quand la pente diminue.

La technique des terrasses soutenues par les talus s'applique aux talus qui ont généralement une hauteur comprise entre 1 et 2,5 m. les terrasses sont confectionnées selon les courbes de niveau. (fig. 40)



a/ Les terrasses en gradins soutenues par des talus



b/ Les terrasses soutenues par des murs en pierre

Fig.40 : Une vue de versants aménagés par des terrasses soutenues par a/ des talus et par b/ des murs en pierre.

viii. Captation des eaux de ruissellement :

Les exutoires servent à recueillir les eaux de ruissellement apportées par les ouvrages de canalisation.

Exutoires naturels: ce sont des prairies permanentes installées dans des dépressions pouvant être fauchées ou pâturées sur pente faible composés d'espèces à fort pouvoir de pompage (peupliers, saules...) (fig.41)



Fig.41 : Exutoire naturel sous forme de petit ravin.

Exutoires artificiels:

Les bandes d'arrêt enherbées : peuvent réduire le ruissellement de 30 ou 60 % par rapport au témoin et l'érosion de 30 et jusqu'à 10 % du témoin (Roose et Bertrand, 1971). (fig.42)



Fig.42 : Les « bandes enherbées » protègent l'eau et jouent éventuellement un rôle important de corridor biologique.

Les cordons de pierres : Il s'agit de deux à trois niveaux de pierres rangées en courbe de niveau de façon à se renforcer l'une l'autre. Ces cordons de pierres ralentissent le ruissellement, l'étaient en nappes de telle sorte qu'il s'infiltre en moins d'une heure, provoquant ainsi la sédimentation successive des sables, des agrégats puis des particules fines humifères, lesquelles vont former une croûte de sédimentation. Seul l'excédent des eaux passe au-dessus du premier niveau de pierres. (fig.43)

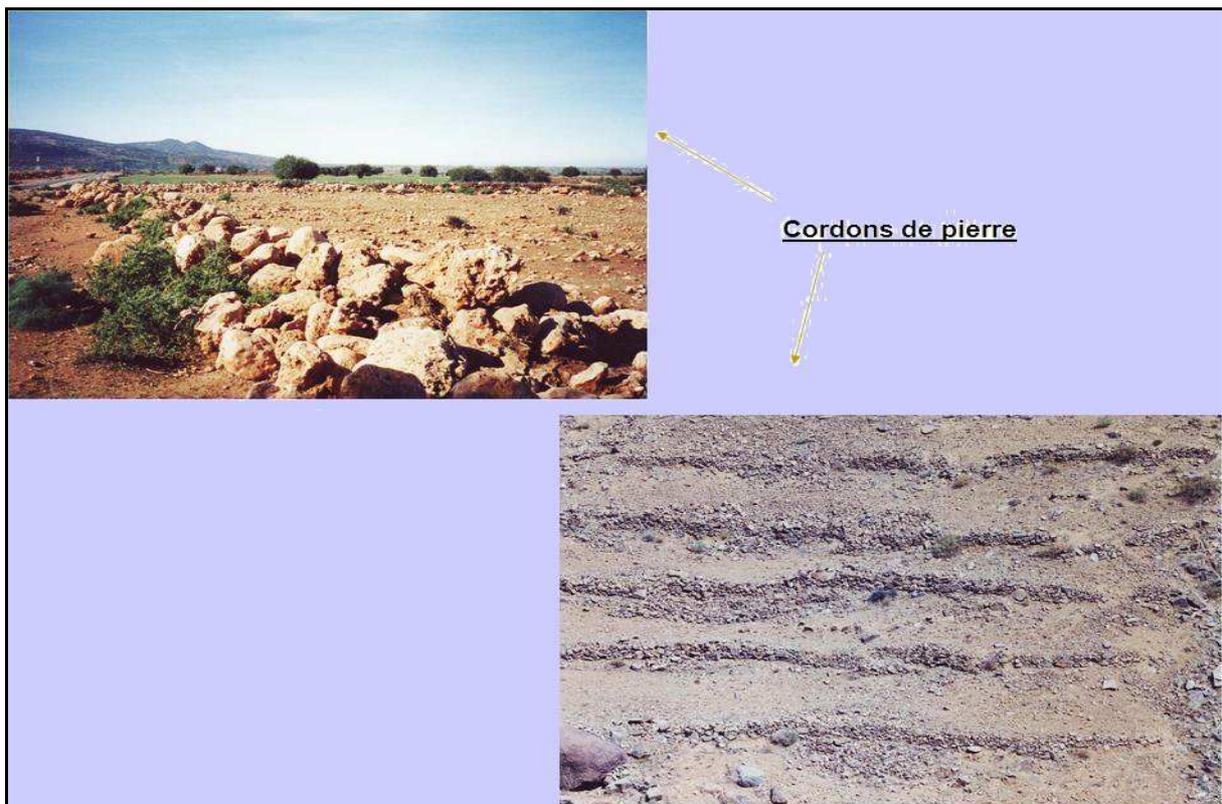


Fig.43 : Cordons de pierre.

Les murettes de pierres sèches : Il s'agit d'un mur construit soigneusement en empilant des pierres plates calées par de petits fragments de roche. On en trouve fréquemment dans les massifs montagneux gréseux. Pour construire un muret de pierres sèches, il faut d'abord creuser une tranchée en courbe de niveau jusqu'à un horizon cohérent, mettre en place, au fond et sur la paroi de la tranchée, un filtre drainant constitué d'une couche de sable et de gravier. Les murettes sont des structures plus stables que les cordons. (fig.44)



Fig.44 : Une vue de près sur une murette.

Les bassins de sédimentation : sont des ouvrages fréquemment réalisés pour empêcher l'érosion des berges et l'érosion en ravins. Ils arrêtent l'érosion causée par un écoulement concentré mais sont inefficaces contre l'érosion en nappe.

Egalement connus sous le nom de « terrasses en canaux », ces bassins versent en quelque sorte de réservoirs aux eaux de crues pour les petits bassins versants. Ils empêchent l'érosion des terres situées en aval contrôlant le débit de pointe de l'écoulement du bassin versant. (fig.45)



Fig.45 : Lac collinaire dans la région nord Marocain installé pour contrer le problème d'envasement d'un barrage en aval.

ix. Protection des pentes contre l'érosion :

Travaux selon courbes de niveau: culture en courbes de niveaux (action de cultiver la terre en suivant le relief plutôt que la pente). En ce faisant, on oriente la rugosité du sol due aux mottes et aux petits creux, on les oriente perpendiculairement à la pente de telle sorte que l'on ralentit au maximum la nappe d'eau qui pourrait ruisseler. Ce procédé utilisé comme moyen de conservation des sols et de l'eau, n'est efficace que sur les pentes faibles ne dépassant pas 4%. Sur ces pentes, les travaux selon les courbes de niveau suffisent pour contrecarrer l'érosion en nappe.

Culture en bandes alternantes : C'est un procédé de culture en bandes parallèles (le plus souvent parallèles aux courbes de niveau) qui est utilisé lorsque la pente augmente et que le labour selon les courbes de niveau ne suffit pas pour arrêter l'érosion.

iii. Correction torrentielle :

Elle s'applique au ravinement et aux torrents. Dans le cas des petites ravines, la correction peut être effectuée par la fixation biologique et l'implantation d'une végétation arborée ou herbacée qui peut constituer une armure défendant les bas-fonds. Mais aussi par l'utilisation des petits seuils en pierres sèches peut jouer un rôle provisoire dans la correction de ravinement avant la mise en place des seuils biologiques. (fig.46)



Fig.46 : seuils en pierres sèches dans la vallée d'Ourika.

En cas des grosses ravines, la protection est s'effectue par des barrages en gabions et en maçonnerie dont l'objectif est de réduire la vitesse de ruissellement, retenir les sédiments et protéger les infrastructures socio-économiques en aval.

Les gabions sont des seuils en pierres sèches empilées dans des caisses de grillage métallique galvanisé. ils sont recommandés pour les sols argileux ou argilo-limoneux et ont les dimensions suivantes: 1m de largeur, 1m de hauteur et 1 à 4 m de longueur. (fig.47)



Fig.47 : Seuils en gabion dans la vallée de l'Ourika.

Les seuils en maçonnerie sont utilisés pour les ravins qui sont développés sur les formations calcaires ou marno-calcaires . son hauteur est de 2 à 3 m. (fig.48)



.48 : Seuils en maçonnerie dans la vallée de l'Ourika.

Fig

8. Projet d'aménagement du bassin du N'Fis :

Le tableau 11 montre le projet d'aménagement du bassin versant de N'Fis

Projet	action	unité	Total 2005- 2010	Prévision 2011	Prévision 2012	Prévision 2013
Aménagement du bassin versant du N'Fis	Reboisement	Ha	1 380	360	400	400
	Regarnis	Ha	700	–	200	200
	Amélioration sylvo-pastorale	Ha	600	400	400	400
	Régénération	Ha	100	–	–	–
	Correction des ravins	m ³	34 780	10 000	20 000	20 000

Tab.11 : Projet d'aménagement du bassin du N'Fis (source : DREFM).

Le tableau montre que :

- Les réalisations des reboisements depuis 2005 à 2010 est 1380 Ha, qui a connu un échec de 50,72% (regarnis = 700 Ha). Les prévisions sont de l'ordre de 360 Ha pour 2011 ; 400 Ha pour 2012 ; et 400 Ha pour 2013.
- L'amélioration sylvo-pastorale vise la protection du sol et la lutte contre le parcours extensif. Le programme réalisé depuis 2005 jusqu'à 2010 est de 600 Ha, et le programme prévu pour 2011 ; 2012 ; et 2013 est de 1200 Ha.
- La régénération a pour but la conservation des espèces autochtone, mais demeure de loin insuffisante. Le programme réalisé est de 100 Ha.
- Les corrections des ravins réalisées sont de 34 780 m³ et les prévisions sont de 50 000 m³ qui s'échelonne sur 2011, 2012, et 2013.

Vu la configuration du terrain qui n'échappe pas à la règle de haut montagne et qui est très accidenté et très raviné, la tâche de la protection se complique d'avantage car les travaux de correction sont couteux et souvent le manque de crédit aggrave la situation, donc ces chiffres des réalisations physiques précités restent insuffisantes et démontrent très bien que l'intervention humaine est très devancé par l'érosion et son impact sur l'environnement.

Conclusion générale :

Le bassin versant du N'Fis est un sous bassin principal de l'oued Tensift, il est soumis à un climat semi-aride et coule dans une vallée où le milieu physique accentue l'impact du phénomène de l'érosion, notamment par ses pentes élevées, sa faible couverture végétale (63% des terres de l'ensemble du bassin versant sont totalement dénudées), sa faible perméabilité (71% des sols sont imperméables), ses crues dangereuses qui durent généralement plus de deux jours et aussi bien par sa morphologie.

Toutes ces constatations précitées se traduisent par des apports importants en sédiments et un comblement rapide de la retenue à l'aval ce qui diminue sa capacité de stockage en eau et donc sa durée de vie.

Les moyens utilisés actuellement pour la lutte contre l'érosion sont encore très insuffisants. Il est donc primordial de chercher des nouvelles techniques pour la protection de l'amont du barrage en matière de :

- 1) correction mécanique des pentes des versants et des berges et ;
- 2) protection de la végétation par la réduction de l'impact du parcours intensif et de prélèvement du bois et par l'intensification des reboisements.

Cependant, ces deux types d'intervention ne peuvent apporter leur fruits sans

- 1) l'amélioration du niveau de vie de la population riveraine,
- 2) la sensibilisation de la population et sa rééducation à la protection de l'environnement par l'encouragement des reboisements et d'arboricultures, afin que cette sensibilisation se répercute sur leur mode de vie.

Références bibliographiques

Abou-Elaz.K, Maimouna.I, 2006. Le bassin versant du N'Fis (Haut Atlas de Marrakech) situation hydro-pluviométrique et bilans hydrologiques. Mémoire de fin d'études, FSTG.

ABHT, 2006. Débat national sur l'eau.

ABHT. Atlas des zones inondables

Cheggour.A, 2008. mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des S.I.G :application au bassin versant de la Rheraya, Haut Atlas, Maroc. Thèse de doctorat d'hydrologie, science du sol et environnement, faculté des sciences semlalia.

El Wahidi.F, 2004. Le cyprès de l'Atlas, in « Les espèces de cyprès », publication supmed, l'Italie ;division de Recherches et d'Exploitations Forestières ;Centre régional de la recherche forestière, Marrakech, Maroc ;19 P ;Edizioni Centro Promozione Pubblicità- Firenze.

Fniguire.F, Boukrim.S, 2007. Etude dynamique et statistique des crues du Haut Atlas de Marrakech, cas des bassins versants du N'Fis, de la Rheraya et de l'Ourika . Mémoire de fin d'études, FSTG.

Hanich.L¹, Simoneaux.V², Boulet.G et Chehbouni.AG². hydrologie des bassins versants du Haut Atlas marocain. 1 faculté des sciences et techniques de Marrakech et 2 : centre d'études spatiales de la biosphère (CESBIO) .

Haut commissariat du plan,2006. Statistiques environnementales au Maroc.

Lahlou.A. la dégradation spécifique des bassins versants et son impact sur l'envasement des barrages. Chef de la division d'exploitation, ministre de l'équipement, Rabat, Maroc.

Moukhchane.M. différentes méthodes d'estimation de l'érosion dans le bassin versant de Nakhla (Rif occidental, Maroc).

Remin.W, Remini.B, 2003. La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du Nord. Département de génie rural, université de Blida.

Saidi et al (2003). Rôle du milieu physique dans l'amplification des crues en milieu montagnard, exemple de la crue du 17 août 1995 dans la vallée de l'Ourika (Haut-Atlas, Maroc). Sécheresse, Volume 14-2, p. 107-114,

Liste des figures :

Fig.1 : Carte de situation géographique du N'Fis dans le bassin de Tensift.

Fig.2 : Carte hypsométrique du bassin du N'Fis.

Fig.3 : Courbe hypsométrique du bassin du N'Fis à Imin El Hammam.

Fig. 4 : Profil en long de l'oued N'Fis.

Fig.5: Carte géologique du bassin versant du N'Fis (extrait de la carte géologique de Marrakech au 1/500 000).

Fig.6 : Carte du réseau hydrographique du bassin du N'Fis

Fig. 7 : Carte de végétation de la rive gauche du bassin du N'Fis (Al Ifriqui.M ; 1986)

Fig.8 : Carte de vulnérabilité du bassin du N'Fis.

Fig.9 : Précipitations moyennes mensuelles de N'Fis à Imin El Hammam.

Fig.10 : Précipitations moyennes saisonnières de N'Fis à Imin El Hammam.

Fig.11 : Précipitations moyennes annuelles de N'Fis à Imin El Hammam.

Fig.12 : Débits moyens mensuels de N'Fis à Imin El Hammam.

Fig.13 : Débits moyens saisonniers de N'Fis à Imin El Hammam.

Fig.13 : Débits moyens annuels de N'Fis à Imin El Hammam.

Fig.14 a : Corrélation pluie-débit mensuels de N'Fis à Imin El Hammam.

Fig.14 b : Corrélation pluie-débit annuels de N'Fis à Imin El Hammam.

Fig.15 : Hydro gramme de la crue du 13/11/1967.

Fig.16 : Hydro gramme de la crue du 17/08/1995.

Fig.17 : Hydro gramme de la crue du 28/10/1999.

Fig.18 : Temps de base des crues du N'Fis (1966-2006).

Fig.19 : Temps de montée des crues du N'Fis (1966-2006).

Fig.20 : Répartition mensuelle des crues du bassin du N'Fis.

Fig.21 : Sondeur mono faisceau (angle de transmission compris entre 15°et 30°)

Fig.22 : Sondeur multifaisceaux (angle de transmission compris entre 90°et 150°)

Fig.23 : Principe du sondeur multifaisceaux : technique des faisceaux croisés.

Fig.24 : Principe de traitement des données bathymétrique.

Fig.25 : Principe de l'analyse d'évolution bathymétrique.

Fig.26 : Erosion en nappe : (a-sol sec, b-effet splash, c-ruissellement hortonien).

Fig.27 : Erosion linéaire.

Fig.28: Glissements lents.

Fig.29 : Schéma expliquant le phénomène du glissement en planche.

Fig.30 : Charge solide laisser par la crue du 17/08/1995 (vallée de l'Ourika).

Fig.31 : Glissement rotationnel en coup de cuillère.

Fig.32 : Propagation du courant de densité (Remini,2003).

Fig.33 a : Nombre de barrages .

Fig.33 b : Capacité de stockage (milliards de m³).

Fig.34 : Envasement moyen annuel(millions de m³).

Fig.35: Situation géographique du barrage de Takerkoust.

Fig.36 : Structure d'un barrage poids en béton.

Fig.37 : Ouvrages annexes d'un barrage.

Fig.38 : Evolution du volume de la retenue et du taux d'envasement dans la retenue du barrage de lalla Takerkoust.

Fig.39 : Plantations fruitières et forestières sur banquettes.

Fig.40 : Une vue de versants aménagés par des terrasses soutenues par a/ des talus et par b/ des murs en pierre.

Fig.41 : Exutoire naturel sous forme de petit ravin.

Fig.42 : Les « bandes enherbées » protègent l'eau et jouent éventuellement un rôle important de corridor biologique.

Fig.43 : Cordons de pierre

Fig.44 : Une vue de près sur une murette.

Fig.45 : Lac collinaire dans la région nord Marocain installé pour contrer le problème d'envasement d'un barrage en aval.

Fig.46 : Ravin aménagé dans un champ de céréale : seuils en pierres sèches.

Fig.47 : Seuils en gabion dans la vallée de l'Ourika.

Fig.48 : Seuils en maçonnerie dans la vallée de l'Ourika.

Liste des tableaux :

Tab.1 : Répartition hypsométrique du bassin du N'Fis à Imin El Hammam.

Tab 2 : Classes des pentes de l'oued N'Fis a Imin El Hammam en fonction de la distance.

Tab.3 : Caractéristiques morphologiques du bassin versant du N'Fis.

Tab.4 : Occupation des sols du bassin du N'Fis (d'après DREFM)

Tab.5 : Caractéristiques de la crue du 13/11/1967.

Tab.6 : Caractéristiques de la crue du 17/08/1995.

Tab.7 : Caractéristiques de la crue du 28/10/1999.

Tab.8 : Comparaison entre les dix barrages les plus envasés du pays du Maghreb.

Tab.9 : Résultat des levés bathymétriques de la retenue de Takerkoust durant la période 1981-2004.

Tab.10 : Comparaison entre les 22 grand barrages du Maroc (Source : ministre de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement (état en 1999))

Tab.11 : Projet d'aménagement du bassin du N'Fis (source : DREFM).

Liste des annexes :

Annexe 1 : Réseau des séguias.

Annexe 2 : Pluies mensuelles en mm à Imin El Hammam(1968-2010).

Annexe 3 : Débits mensuels en m³/s à Imin El Hammam (1965-2009).

Annexe 4 : Caractéristiques des crues maximales annuelles du N'Fis à Imin El Hammam(1966-2006).

Annexes

Annexe 1 : réseau des séguia

SEGUIAS	N°IRE	Carte au 1/50000	COORDONNEES		Nature du point d'eau	Long totale (km)	Super. dominé e (ha)	Super. irrigué e (ha)	Cycles de dérivation et débits
			X	Y					
AMZOUGH		TAMASLOHT	239.871	88.615	Séguia bétonnée	0.5	20	20	permanente
EL MRAH	2133/53	TAMASLOHT	239.781	88.766	Séguia bétonnée	0.6	20	20	permanente
TAGUENZA	2138/53	TAMASLOHT	240.522	91.983	SOURCE	0.8	15	15	Débit permanent de 8l/s à partir du canal NFIS
EL FKIH SI TOUNSI	2074/53	TAMASLOHT	239.497	94.767	Séguia en terre (0,1 bétonnée)	0.7	1	1	Eaux privées appartenant aux frères oulad si tounsi
IMARINE	2073/53	TAMASLOHT	240.645	94.464	Séguia bétonnée	4			Débit permanent de 40l/s à partir du canal NFIS
ASKJOUR		TAMASLOHT	238.843	99.502	Séguia en terre	4	200	106	5 jours
AIT ABDESLAM	2553/53	TAMASLOHT	238.704	99.73	Séguia en terre	0.8	1	1	Exploitée entièrement par la famille AIT ABDSLAM
AGAFAI	Détruite et remplacée par AGAFAI TERRE	TAMASLOHT	237.391	101.977	Séguia en terre avec 0,2 km en béton	3			
AGAFAI TERRE	2068/53	TAMASLOHT	236.886	103.45	Séguia en terre	18			Débit dérivé à partir du canal NFIS est de 400l/s durant 12jours
AGAFAI BETONNE	2136/53	TAMASLOHT	236.886	103.45	Séguia bétonnée	6			Permanente avec 31l/s
DJEDIDA	2069/53	TAMASLOHT	237.477	102.616	Séguia bétonnée	22			Débit dérivé à partir du canal NFIS est de 763l/s durant 12jours et le débit max dérivé à partir oued est de 3000l/s
TAMESGUEFT	2070/53	TAMASLOHT	237.211	103.164	Séguia en terre avec 16 km en béton	28			4 tours d'eau ont été dérivés par la séguia pd les 4 premiers mois 2003
TARGA N°FIS	2139/53	MARRAKECH-GUELIZ	237.962	103.429	Séguia bétonnée	13			10 jours
ASKEJJOUR(canal)	2065/53	MARRAKECH-GUELIZ	237.028	103.969	Séguia bétonnée sur 2 km	5		150	Permanente 40l/s

SOUIGUIA	2066/53	TAMASLOHT	238.115	100.672	Séguia en terre								En cas d'excédent d'eau dans le barrage, la séguia bénéficie d'un tour de 100l/s durant 12jours
----------	---------	-----------	---------	---------	-----------------	--	--	--	--	--	--	--	---

Annexe 2 : pluies mensuelles en mm à Imin El Hammam(1968-2010)

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
1968/69						0,0	80,0	112,0	71,0	18,0	5,0		286,0
1969/70			86,0	71,0			82,0	53,0	9,0	0,0	0,0	3,0	304,0
1970/71	0,0	19,0	16,0	96,0	69,0	47,0	109,0	163,0	106,0	22,0	0,0		647,0
1971/72	0,0	6,0	99,0	17,0	32,0		81,0	15,0	57,0	0,0	0,0	0,0	307,0
1972/73	13,0	74,0	84,0	15,0	24,0	22,0	82,0	60,0	11,0	1,0	0,0	6,0	392,0
1973/74	0,0	65,0	91,0	98,0	14,0	139,0	101,0	144,0	16,0	12,0	9,0	0,0	689,0
1974/75	20,0	13,0	13,0	8,0	9,0	20,0	40,0	145,0	49,0	6,0	0,0	0,0	323,0
1975/76	25,0	10,0	24,0	4,0	14,0	28,0	65,0	174,0	105,0	2,0	0,0	2,0	453,0
1976/77	10,0	66,0	0,0	49,0	130,0	41,0	47,0	1,0	0,0	11,0	0,0	0,0	355,0
1977/78	30,0	87,0	19,0	32,0	83,0	15,0	0,0	69,0	10,0	40,0	0,0	7,0	392,0
1978/79	18,0	31,0	0,0	35,0	51,0	40,0	9,0	9,0	3,0	5,0	0,0	0,0	201,0
1979/80	56,0	139,0	0,0	2,0	45,0	62,0	103,0	44,0	5,0	9,0	0,0	2,0	467,0
1980/81	0,0	44,0	74,0	0,0	22,0	33,0	44,0	11,0	18,0	6,0	0,0	0,0	252,0
1981/82	9,0	30,0	7,0	28,0	58,0	29,0	11,0	198,0	96,0	0,0	29,0	0,0	495,0
1982/83	17,0	12,0	25,0	40,0	0,0	53,0	22,0	49,0	18,0	0,0	0,0	0,0	236,0
1983/84	0,0	20,0	36,0	17,0	4,0	2,0	85,0	33,0	86,0	0,0	0,0	0,0	283,0
1984/85	7,0	4,0	52,0	0,0	143,0	25,0	22,0	91,0	53,0	5,0	0,0	0,0	402,0
1985/86	0,0	3,0	42,0	14,0		33,0	29,0	19,0	36,0	22,0	0,0	0,0	198,0
1986/87	3,0	12,0	38,0	0,0	34,0	44,0	64,0	3,0	1,0	27,0	0,0	0,0	226,0
1987/88	13,0	106,0	51,0	32,0	99,0	81,0	53,0	2,0	33,0	0,0	11,0	1,0	482,0
1988/89	1,0	52,0	116,0	0,0	33,0	67,0	108,0	75,0	17,0	0,0	0,0	13,0	482,0
1989/90	8,0	80,0	33,0	15,0	23,0	0,0	82,0	9,0	20,0	25,0	8,0	2,0	305,0
1990/91	7,0	4,0	7,0	44,0	1,0	121,0	172,0	18,0	1,0	7,0	3,0	4,0	389,0
1991/92	11,0	27,0	31,0	36,0	0,0	57,0	78,0	71,0	10,0	55,0	0,0	17,0	393,0
1992/93	1,0	48,0	25,0	15,0	34,0	31,0	19,0	35,0	13,0	0,0	1,0	0,0	222,0
1993/94	2,0	31,0	93,0	39,0	70,0	60,0	62,0	2,0	12,0	0,0	0,0	0,0	371,0
1994/95	7,0	75,0	9,0	0,0	0,0	61,0	53,0	92,0	0,0	9,0	0,0	0,0	306,0
1995/96	9,0	43,0	22,0	49,0	102,0	74,0	158,0	10,0	55,0	26,0	0,0	0,0	548,0
1996/97	11,0	12,0	74,0	106,0	80,0	8,0	35,0	157,0	25,0	5,0	2,0	1,0	516,0
1997/98	71,0	60,0	42,0	83,0	33,0	13,0	42,0	29,0	26,0	0,0	0,0	0,0	399,0

1998/99	11,0	103,0	0,0	51,0	74,0	74,0	57,0	4,0	13,0	0,0	0,0	2,0	389,0
1999/00	1,0	142,0	51,0	41,0	10,0	0,0	0,0	34,0	36,0	0,0	0,0	1,0	316,0
2000/01	0,0	28,0	16,0	16,0	34,0	7,0	19,0	32,0	3,0	0,0	0,0	1,0	156,0
2001/02	9,0	1,0	17,0	31,0	1,0	21,0	39,0	146,0	37,0	74,0	0,0	0,0	376,0
2002/03	0,0	10,0	41,0	25,0	19,0	2,0	38,0	42,0	11,0	23,0	4,0	0,0	215,0
2003/04	0,0	184,0	72,0	39,0	0,0	24,0	36,0	77,0	27,0	15,0	2,0	0,0	476,0
2004/05	4,0	39,0	35,0	51,0	6,0	49,0	37,0	0,0	15,0	15,0	0,0	22,0	273,0
2005/06	0,0	81,0	40,0	22,0	92,0	45,0	1,0	43,0	5,0	29,0	27,0	0,0	385,0
2006/07	13,0	64,0	30,0	16,0	22,0	68,0	2,0	86,0	55,0	0,0	0,0	11,0	367,0
2007/08	2,0	9,0	61,0	8,0	27,0	21,0	21,0	14,0	35,0	0,0	5,0	0,0	203,0
2008/09	40,0	82,0	59,0	31,0	113,0	71,0	90,0	1,0	3,0	30,0	0,0	0,0	520,0
2009/10	43,0	3,0	1,0	<u>10,0</u>	62,0	94,0	54,0						<u>267,0</u>
Moyenne	11,8	48,0	39,8	31,4	42,7	42,1	55,5	57,9	29,3	12,2	2,6	2,4	363,4
Max	71,0	184,0	116,0	106,0	143,0	139,0	172,0	198,0	106,0	74,0	29,0	22,0	689,0
Min	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	156,0

Annexe 3 : débits mensuels en m³/s à Imin El Hammam (1965-2009)

AN /MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	MOY
1965 - 66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,062	-
1966 - 67	0,578	2,260	7,060	3,020	1,850	3,350	30,400	7,100	6,670	3,100	0,816	0,272	5,540
1967 - 68	0,975	6,290	103,00	17,400	9,490	10,100	13,900	20,400	11,400	5,340	3,460	0,951	16,892
1968 - 69	0,871	1,020	4,790	5,160	12,200	18,500	12,000	6,490	5,150	3,080	0,986	0,188	5,870
1969 - 70	0,123	6,410	7,600	7,500	41,200	11,400	7,940	8,770	4,930	2,900	0,738	0,136	8,304
1970 - 71	0,134	1,960	16,200	12,700	15,700	11,400	9,760	19,800	19,100	10,800	4,400	1,320	10,273
1971 - 72	0,866	1,730	8,030	4,580	3,740	4,820	11,300	10,700	7,190	3,940	1,430	0,417	4,895
1972 - 73	0,529	1,980	2,600	5,730	3,200	3,880	6,190	4,000	1,760	0,871	0,092	0,050	2,574
1973 - 74	0,050	0,243	1,070	2,150	1,600	2,550	11,900	23,800	15,200	5,870	1,850	0,422	5,559
1974 - 75	0,509	0,756	1,050	1,250	1,200	0,811	0,401	3,130	3,420	0,434	0,106	0,028	1,091
1975 - 76	0,086	0,167	0,288	1,370	0,839	2,170	5,580	6,860	9,270	2,760	0,305	0,021	2,476
1976 - 77	3,410	1,900	2,050	1,420	3,480	2,910	1,660	1,490	0,764	0,319	0,046	0,066	1,626
1977 - 78	1,520	0,718	1,270	2,470	25,300	13,000	8,810	6,190	3,170	1,640	0,237	0,067	5,366
1978 - 79	0,082	0,572	1,010	1,190	36,100	21,900	10,500	10,800	6,550	2,780	0,543	0,027	7,671
1979 - 80	0,548	3,130	1,700	1,420	1,460	4,190	29,200	15,600	6,280	2,230	0,345	0,108	5,518

1980 - 81	0,589	2,300	5,130	2,190	1,280	6,850	11,800	8,010	2,920	1,120	0,141	0,009	3,528
1981 - 82	0,000	0,817	0,931	0,799	1,310	1,170	1,340	8,170	6,030	1,220	0,120	0,000	1,826
1982 - 83	0,091	0,004	2,060	0,819	0,791	0,789	1,580	0,689	1,710	0,165	0,104	0,000	0,734
1983 - 84	0,000	2,910	24,800	3,980	1,320	0,554	1,310	0,860	2,100	0,220	0,022	0,000	3,173
1984 - 85	0,000	0,000	4,160	3,250	9,100	9,580	7,020	6,690	9,200	1,690	0,223	0,031	4,245
1985 - 86	0,007	0,099	0,352	0,690	1,100	1,170	12,800	4,650	1,980	0,499	0,056	0,030	1,953
1986 - 87	0,109	0,715	0,485	0,634	5,720	7,820	1,880	0,609	0,725	1,100	0,012	0,000	1,651
1987 - 88	0,003	7,970	33,600	38,800	1,570	33,600	93,600	25,800	10,800	5,300	1,370	0,427	21,070
1988 - 89	0,523	7,370	106,00	13,700	6,150	6,910	11,800	20,000	8,500	4,620	1,460	1,000	15,669
1989 - 90	0,728	32,900	40,900	49,000	18,400	8,370	36,000	16,100	11,800	6,070	2,710	0,447	18,619
1990 - 91	1,880	1,340	0,744	1,480	1,320	2,290	15,000	13,000	4,910	1,880	0,666	0,696	3,767
1991 - 92	0,187	1,020	1,070	62,900	8,780	17,300	34,700	29,200	12,400	6,320	2,140	0,913	14,744
1992 - 93	0,729	1,530	1,660	2,510	2,600	3,120	4,680	2,720	1,860	0,953	0,714	0,141	1,935
1993 - 94	0,002	5,870	16,100	4,970	3,090	4,030	31,100	13,800	4,190	1,080	0,139	2,210	7,215
1994 - 95	0,135	0,958	1,670	0,785	0,657	1,800	3,660	19,400	3,350	0,496	0,336	3,610	3,071
1995 - 96	0,414	0,478	3,210	25,200	31,000	49,800	86,000	75,400	35,200	30,600	2,570	1,430	28,442
1996-97	1,800	1,230	3,310	5,940	14,900	11,000	9,000	22,500	14,400	5,180	1,380	1,510	7,679
1997-98	2,630	2,540	1,620	1,460	2,320	43,000	18,800	11,800	3,540	2,160	0,639	0,225	7,561
1998-99	0,000	0,175	0,642	3,730	3,660	1,780	1,950	1,750	0,249	0,475	0,039	0,713	1,264
1999-2000	0,388	38,500	7,540	6,060	3,990	3,540	8,050	4,640	0,121	0,115	0,042	0,004	6,083
2000-2001	0,000	0,042	0,068	0,192	0,216	0,175	0,192	0,190	0,147	0,021	0,000	0,000	0,104
2001-2002	0,000	0,000	0,159	6,040	1,600	1,720	2,510	18,800	3,810	0,884	0,066	0,062	2,971
2002-2003	0,004	0,001	1,240	11,700	1,280	1,230	2,290	2,200	2,280	1,300	0,310	2,640	2,206
2003-2004	0,456	2,490	4,470	4,830	2,590	5,290	5,630	8,210	7,460	3,580	0,575	0,430	3,834
2004-2005	0,451	4,390	1,520	3,670	2,560	3,250	12,600	7,570	4,240	4,050	3,540	6,450	4,524
2005-2006	1,161	3,716	3,484	5,091	6,585	8,846	6,432	8,961	4,253	1,532	1,295	2,172	4,461
2006-2007	0,849	1,260	1,120	0,971	0,915	2,660	1,030	1,010	0,842	0,722	0,688	0,710	1,065
2007-2008	0,000	0,000	0,979	0,834	1,040	4,750	0,921	0,351	0,167	0,291	0,196	0,090	0,802
2008-2009	0,265	1,86	1,73	0,357	0,388	0,56	4,58	0,783	0,783	1,180	0,506	1,110	1,175
MOYENNE	0,551	3,526	9,964	7,673	6,828	8,231	13,670	11,139	6,066	3,044	0,870	0,724	6,024

Annexe 4 : caractéristiques des crues maximales annuelles du N'Fis à Imin El Hammam(1966-2006)

année		date début	date fin	Qp m ³ /s	Qmax moy m ³ /s	Qbase avant m ³ /s	Qbase après m ³ /s	V olume 10 ⁶ m ³	Temps base (heures)	Temps montée (heures)	coefficie pointe
1966	67	01/03/1967 à 16h	05/03/1967 à 16h	335,000	109,339	15,700	47,000	37,394	95,0	40,0	3,1
1967	68	12/11/1967 à 8h	18/11/1967 à 16h	1400,000	338,861	68,000	82,000	184,205	151,0	32,0	4,1
1968	69	26/02/1969 à 16h	02/03/1969 à 8h	89,600	15,914	19,500	23,300	4,984	87,0	24,0	5,6
1969	70	04/01/1970 à 2h	07/01/1970 à 16h	720,000	137,269	27,300	47,900	42,004	85,0	10,0	5,2
1970	71	28/12/1970 à 8h	31/12/1970 à 8h	110,000	33,233	9,850	28,400	8,494	71,0	13,0	3,3
1971	72	08/03/1972 à 8h	09/03/1972 à 8h	38,500	10,420	11,300	11,800	0,863	23,0	5,0	3,7
1972	73	18/06/1973 à 12h	18/06/1973 à 23h	40,700	14,509	0,298	2,860	0,522	10,0	5,0	2,8
1973	74	08/04/1974 à 20h	12/04/1974 à 8h	47,600	7,474	25,350	28,400	2,233	83,0	24,0	6,4
1974	75	06/05/1975 à 2h	07/05/1975 à 8h	50,100	14,297	6,690	7,160	1,493	29,0	3,0	3,5
1975	76	07/05/1976 à 16h	08/05/1976 à 16h	36,000	9,005	8,660	14,700	0,745	23,0	3,0	4,0
1976	77	26/09/1976 à 12h	29/09/1976 à 12h	111,000	24,609	0,037	11,100	6,290	71,0	4,0	4,5
1977	78	06/01/1978 à 16h	10/01/1978 à 8h	301,000	70,878	22,500	32,400	22,709	89,0	25,0	4,2
1978	79	18/01/1979 à 8h	20/01/1979 à 16h	400,000	157,539	38,800	51,700	31,193	55,0	7,0	2,5
1979	80	16/03/1980 à 12h	19/03/1980 à 12h	132,000	34,710	23,600	40,900	8,872	71,0	6,0	3,8
1980	81	03/10/1980 à 8h	05/10/1980 à 12h	44,800	10,499	2,050	5,740	1,927	51,0	6,0	4,3
1981	82	26/04/1982 à 8h	27/04/1982 à 12h	58,500	14,476	7,000	8,080	1,407	27,0	9,0	4,0
1982	83	08/11/1982 à 18h	12/11/1982 à 8h	51,400	11,774	0,120	3,400	3,603	85,0	3,0	4,4
1983	84	15/11/1983 à 22h	18/11/1983 à 16h	482,000	97,321	25,100	32,400	22,773	65,0	12,0	5,0
1984	85	09/11/1984 à 1h	10/11/1984 à 18h	86,500	25,170	0,000	4,460	3,624	40,0	3,0	3,4
1985	86	01/03/1986 à 5h	03/03/1986 à 8h	57,000	30,154	2,200	15,000	5,428	50,0	5,0	1,9
1986	87	27/01/1987 à 16h	30/01/1987 à 12h	156,000	49,883	0,400	9,800	12,032	67,0	15,0	3,1
1987	88	02/11/1987 à 5h	06/11/1987 à 0h	810,000	172,272	24,400	42,400	55,816	90,0	9,0	4,7
1988	89	05/11/1988 à 16h	16/11/1988 à 0h	1220,000	124,718	56,100	74,700	110,899	247,0	118,0	9,8
1989	90	23/10/1989 à 16h	29/10/1989 à 12h	455,000	99,703	2,700	57,800	49,891	139,0	28,0	4,6

1990	91	06/03/1991 à 16h	08/03/1991 à 16h	63,900	16,915	3,000	11,900	4,323	71,0	23,0	3,8		
1991	92	07/12/1991 à 2h	12/12/1991 à 16h	446,000	118,323	63,900	72,700	56,653	133,0	29,0	3,8		
1992	93	20/12/1992 à 12h	21/12/1992 à 16h	25,800	8,011	2,400	2,800	0,778	27,0	9,0	3,2		
1993	94	30/10/1993 à 16h	03/11/1993 à 8h	283,000	72,435	0,000	28,300	22,686	87,0	11,0	3,9		
1994	95	17/08/1995 à 16h	18/08/1995 à 6h	501,000	192,146	0,000	1,580	8,882	13,0	3,0	2,6		
1995	96	14/12/1995 à 16h	17/12/1995 à 16h	502,000	117,236	2,800	31,300	29,965	71,0	29,0	4,3		
1996	97	21/12/1996 à 16h	24/12/1996 à 16h	70,600	22,348	1,500	10,800	5,712	71,0	14,0	3,2		
1997	98	07/02/1998 à 16h	12/02/1998 à 20h	274,000	62,372	9,500	51,480	27,618	123,0	11,0	4,4		
1998	99	31/05/1999 à 16h	01/06/1999 à 6h	73,700	30,147	0,123	3,650	1,411	13,0	10,0	2,4		
1999	00	28/10/1999 à 6h	30/10/1999 à 17h	1575,000	208,200	59,700	59,700	43,500	58,0	9,0	7,6		
2000	01	21/10/2000 à 15h	22/10/2000 à 17h	0,645	0,186	0,015	0,056	0,017	25,0	4,0	3,5		
				calcul fait à partir de Badre21									
2001	02	31/03/2002 à 12h	06/04/2002 à 22h	110,400	24,027	3,368	5,096	13,320	154,0	30,0	4,59		
2002	03	13/08/2003 à 12h	15/08/2003 à 19h	364,000	26,384	1,541	1,700	5,220	55,0	27,0	13,79		
2003	04	23/10/2003 à 8h	28/10/2003 à 8h	187,000	11,105	1,32	2,904	4,797	120,0	14,0	16,8		
2004	05												
2005	06	29/11/2005	à 2h00	52,000	27	9,8	13,1	22,4	23,0	8,0	1,9		