

FIG Working Week 18-22 May 2011 in Marrakech, Morocco

**MODELISATION DE L'ÉROSION DANS LE BASSIN DE
OUED REBOA ET SON IMPACT SUR LE BARRAGE DE
TIMGAD
- APPROCHE MULTICRITERES-**

Dridi Hadda Kalla Mahdi Annab Redha

Laboratoire « Risques Naturels et Aménagement du Territoire »
Faculté des sciences - Université de Batna – Algérie.
E-Mail : hadda.dridi@gmail.com

Introduction

- L'érosion du sol atteint dans les zones semi-arides des proportions alarmantes tant sur le plan des quantités érodées que sur le plan de son extension spatiale.
- A ce titre la vallée de Timgad constitue un exemple alarmant de dégradation des sols.
- En effet, l'ensemble du bassin versant est animé par une dynamique érosive très active favorisée par une vulnérabilité élevée à l'érosion en raison des aptitudes propre de ces milieux.
- Par ailleurs, la forte anthropisation à travers une socialisation rapide et continue du milieu a contribué à l'accélération de la dynamique érosive dans ce bassin. Celle-ci constitue un handicap majeur à la pérennité du barrage de koudiet M'daour érigé à l'exutoire du bassin.

- Parmi les causes évidentes de cette érosion :
 - L'agressivité du climat : la variabilité annuelle et interannuelle des précipitation impose un caractère torrentiel des écoulements.
 - La nature lithologique de la surface du bassin renforce l'érodibilité.
 - L'état du couvert végétal : La dégradation de la couverture végétale réduit la protection du sol.
 - La pression anthropique : L'intervention humaine par des pratiques males venues exaspère et précipite les déséquilibres du milieu.
- Ainsi plusieurs questions s'imposent et la réponse à ces questions constitue l'objet de ce travail de recherche :
 - Quels sont les facteurs qui contrôlent le phénomène d'érosion hydrique dans ces régions ?
 - Quels sont les facteurs les plus déterminant ?
 - Quelle est la relation entre les précipitations et l'écoulement superficiel Notamment l'écoulement torrentiel ?
 - Quelle est la relation entre l'écoulement et la charge solide transportée ?
 - Quel est le volume de sédiments déposé dans la cuvette du barrage ?
 - Quelles solutions peut-on préconiser pour réduire la charge solide et assurer la pérennité de l'ouvrage ?

Méthodologie d'approche

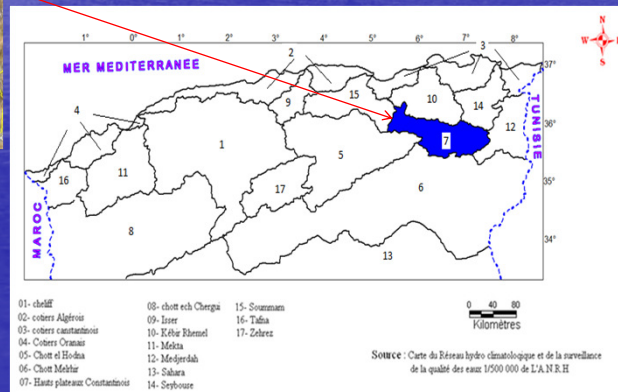
- Nous avons préconisé pour l'étude de ce phénomène une approche multi critères qui prend en considération plusieurs paramètres et leurs interactions et intégrant la dimension *quantitative* dans l'évaluation de l'érosion.
- Pour cela des méthodes statistiques d'analyse ont été nécessaires à l'étude des données hydro-pluviométriques pour la caractérisation des régimes des précipitations et des réponses hydrologiques qui en découlent.
- L'étude débouche sur un certain nombre de modèles mathématiques qui explicitent les relations :
 - Précipitation / écoulement
 - Précipitation / érosion
 - Débit liquide / charge solide
- L'érosion a été exprimée sur un plan spatio-temporel en terme d'*érodibilité* donc de sensibilité à l'érosion.

Présentation physique de la région d'étude

- Le bassin versant de Timgad se situe sur le piémont nord des Aurès en contact avec les hauts plateaux constantinois, il est rattaché au sous bassin (07-04) qui en constitue l'exutoire.



Fig. 1- Les bassins hydrographiques algériens - Situation de la zone d'étude -



- Le bassin de Timgad s'étale sur une superficie de 587.6 Km² circonscrit par un périmètre de 119 Km.
- Sur le plan morphologique le terrain se répartie en trois unités principales :
 - Une zone de plaines représentant 59.05%.
 - Une zone de piémonts avoisinant 38.35%.
 - Une zone de montagnes avec 2.6%.

Ceci se traduit par une certaine variation dans les paysages et les dynamiques.

Analyse physique et morphométrique du bassin

- L'analyse des paramètres morphométriques du bassin nous a permis de mettre en évidence l'aptitude aux écoulements et ainsi les régimes hydrologiques
- Pour mieux appréhender la réponse hydrologique du bassin et apprécier d'une manière précise la dynamique érosive, nous avons divisé celui-ci en trois sous bassins à savoir :
 - Sous bassin de Oued Rbôa à l'Est avec une superficie de 296.54 km²
 - Sous bassin de Oued Timgad à l'Ouest occupant une superficie de 268.02 km²
 - Sous bassin de Oued Morri occupant le centre du bassin avec une superficie avoisinant 23.10 km²
- on notera que les différents paramètres s'expriment différemment d'un sous bassin à l'autre:
- Sur le plan **lithologique** l'ensemble des faciès constituant les affleurements du bassin semblent favorables aux processus d'érosion (Tab.1).

Tab.1- Nature et degré de résistance des faciès lithologiques du bassin

Dureté et degré de résistance du matériel rocheux	Les formations	Superficie km ²		Superficie totale km ²	total
Résistant	- Calcaire massif				
	- Grés				
Moyennement résistant	- Marno-calcaire et argile				
	- Marno-calcaire et conglomérat				
	- Croûte calcaire				
Peu résistant	- Argile et grés				
	- Formations quaternaires détritiques				
	- Alluvions				
Total					

- La nature et l'importance du **couvert végétal** contribuent et renforcent davantage l'érodibilité des sols imposée déjà par la lithologie.



Fig.2- Nature et degrés de couverture végétale dans le bassin

Concernant la pente le B.V. se répartit en trois tranches de pentes dont les valeurs restent assez élevées

Pentes	Surfaces (Ha)	%
0 - 3 %	151.6	25.8
3 - 12.5%	165.2	28.11
12.5 - 25 %	160.3	25.58
25 - 45 %	119.8	20.38
>45 %	0.7	0.13

Tab.2- Classes de pentes – bassin versant

Tab.3- Paramètres morphométriques

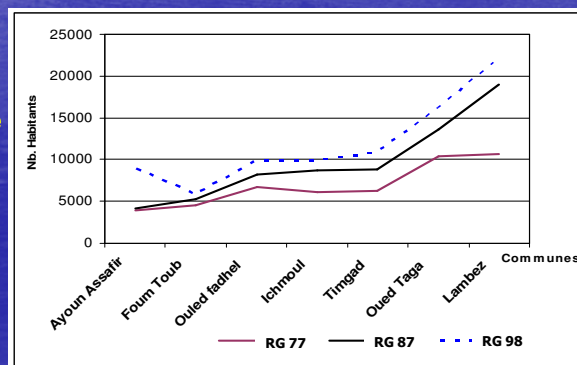
paramètres morphométriques	Dd	Rc	RL	Tc	V _{ec}
S/Bassin Oued Rboa					
S/Bassin Oued Timgad					
S/Bassin Oued Morri					

- Il ressort de l'analyse physique et morphométrique que l'ensemble des paramètres et leur interactions convergent vers l'exaspération et l'amplification des processus d'érosion, en raison d'une aptitude élevée aux écoulements

Analyse socio-économique

- Le bassin de Timgad est caractérisé par une densité de population assez élevée et en constante augmentation depuis plusieurs décennies notamment depuis les travaux de construction du barrage de Koudiet M'daour qui constitue avec ses ouvrages annexes des enjeux énormes.

Fig. 3- Évolution démographique dans le bassin



- La pression anthropique qui s'exprime à travers une socialisation des géosystèmes va connaître un développement sans précédent pour les décennies à venir comme le montrent les estimations des populations à l'horizon 2025 (Tab.5).

Tab.4- Estimation des populations horizons 2025

Communes du bassin	Nb. Habitants	Estimation des populations à différents horizons		
Lambezi	22114	30731	35246	46366
Oued Taga	16154	22448	25747	33870
Timgad	10937	15199	17432	22931
Ichmoul	9887	13739	15758	20730
Ouled Fadhel	9882	13732	15750	20719
Foum Toub	5844	8121	9314	12253
Ayoun Assafir	8969	12464	14295	18805
Total	83787	116434	133544	175675

Analyse hydro-climatologique du bassin

- L'analyse des variables hydroclimatologique et leur variation spatio-temporelle permet de caractériser les régimes qui sont à la base des mécanismes et des processus d'érosion.
- La précision et la fiabilité de l'analyse est fonction de la répartition des stations de mesure et de la qualité de leur données.
- A ce titre le bassin de Timgad n'est équipé que de 07 stations couvrant les tranches d'altitudes situées entre 1010m (station de Rbôa) et 1640 (station de Ain Tine) montrant de nombreuses lacunes dans les séries d'observation.
- Il convient alors d'étendre l'information pluviométrique aux autres secteurs du bassin à l'aide d'un gradient altimétrique basé sur des régressions linéaires et d'opérer les corrections nécessaires.

Les variations temporelles des précipitations

- Les précipitations observées dans le bassin de Timgad entre 1970-2002 sont caractérisées par une grande variabilité annuelle et interannuelle. Ceci apparaît nettement à travers certains indices et paramètres empiriques tel que moyennes, variances et coefficients de variation.
- Par ailleurs les courbes et histogrammes de fréquence de toutes les stations montrent bien ces écarts par rapport à la valeur moyenne à travers le fil des années (Fig.4)

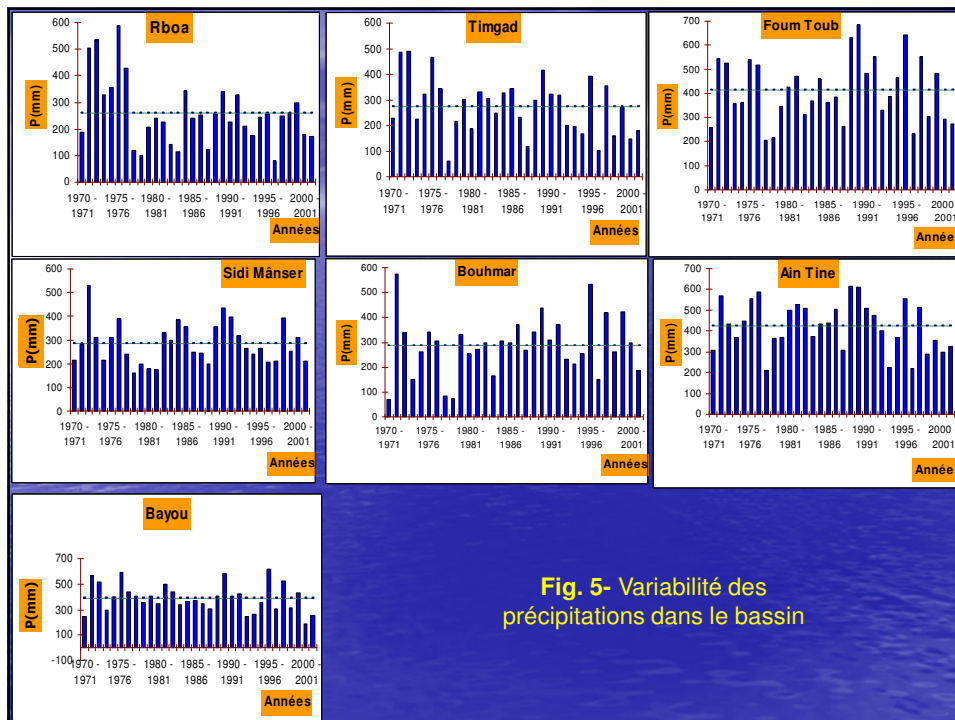


Fig. 5- Variabilité des précipitations dans le bassin

Relation précipitations/altitude $P=f(H)$

- Pour mettre en évidence le rapport entre la répartition des précipitations et l'altitude sous forme de gradient nous avons cherché les équations qui lient le facteur altitude avec la moyenne annuelle des précipitations dans le bassin ainsi que dans les sous bassins (TAB.6).

Tab.5- Gradient pluviométrique du bassin versant et des s/bassins

	Équation du gradient altitudinal $P=f(H)$	Coefficient de corrélation (R)
Le bassin versant	$P = 0.252 * H + 7.757$	
S/Bassin Oued Rboâ	$P = 0.2547 * H + 19.376$	
S/Bassin Oued Timgad	$P = 0.2763 * H - 23.382$	
S/Bassin Oued Morri	$P = 0.1141 * H + 149.26$	

- Les stations qui ont été prises en considération sont celles qui ont une influence évidente dans le bassin.
- Il apparaît clairement que les précipitations augmentent avec l'altitude selon des modèles qui varient d'un sous bassin à l'autre (Fig.5)

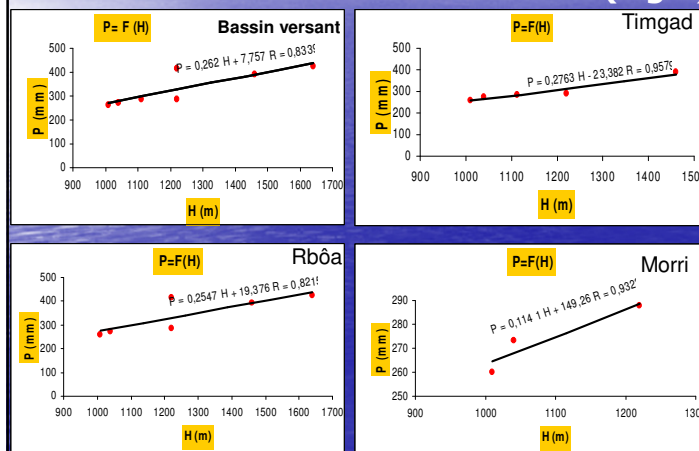


Fig.6- Relation précipitation/altitude $P = f(H)$

Analyse fréquentielle des précipitations journalières maximales (Pj max)

- Nous avons choisi de mettre l'accent sur l'études des précipitations journalières maximales car celle-ci par leur caractère brusque et extrême génèrent des écoulements torrentiels et une agressivité importante à l'égard des sols qui s'exprime par une érodibilité élevée.
- La variable P_{jmax} semble s'ajuster convenablement à une loi de Gumbel.
- Les valeurs maximales récurrentielles probables que pourrait recevoir le bassin sont importantes et pourraient susciter des réactions hydrologiques et morphodynamiques catastrophiques eu égard de la vulnérabilité du bassin(tab.7).

Tab.6- Valeurs récurrentielles des Pj max

	Timgad	Rbôa	Sidi mânser	Bayou	Fou Toub	Bouhmar
P_{jmax} (mm)						
U						
F (P_{jmax})						
T (an)						

La variation temporelle des écoulements

- La réponse hydrologique d'un bassin versant est souvent liée à l'aptitude de ce dernier à l'écoulement, mais surtout au régime et à l'ampleur des sollicitations pluviométriques.
- En raison de l'absence de stations hydrométriques dans le bassin, une estimation des débits et leurs relations avec les précipitations a été effectuée par les méthodes empiriques usuelles.
- L'analyse montre que les débits moyens suivent d'une manière régulière les valeurs des précipitations et présentent une corrélation significatives ($R = 0.84$).

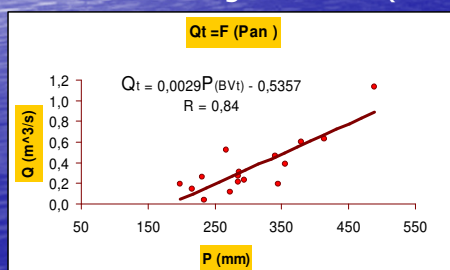


Fig.7- Relation entre précipitations annuelles/débits annuels

Les débits extrêmes

- Les effets les plus dévastateurs en terme d'érosion sont à amputer à l'expression des écoulements extrêmes en l'occurrence les débits maximums (Q_{jmax}).
- Ces variables de débits extrêmes ont été ajustées à une loi de Gumbel (Tab.8).

Tab.7- Débits max fréquentiels

Fréquence (F)			
Réurrence (Année)			
$P_{jmax} F^{\%}$			
$P_{to} F^{\%}$			
$Q_{max} F^{\%}$			

Évaluation quantitative de l'érosion

- L'évaluation quantitative de l'érosion est une donnée indispensable à toute étude d'aménagement ou de faisabilité d'ouvrage hydraulique.
- Nous avons essayé de trouver d'abord la relation reliant les débits liquides journaliers aux débits solides journaliers correspondants par des modèles saisonniers et annuels.
- En se basant sur les caractéristiques du bassin versant et les régimes hydro climatologiques notamment leurs aspects extrêmes, nous avons ensuite essayé d'évaluer l'importance de l'érosion en terme d'ablation spécifique globale et sa répartition spatiale au niveau du bassin.

Tab.8- Relation Q_{lj}/Q_{sj}

		Paramètres de l'équation de régression			Coefficient de corrélation (R)	L'équation
		N	A_0	A		
Saisons	Automne					$Q_s = 13.539Q_l^{1.9223}$
	Hivers					$Q_s = 8.3636 Q_l^{0.9223}$
	Printemps					$Q_s = 7.3236Q_l^{1.1461}$
	Été					$Q_s = 18.446 Q_l^{1.2055}$
Année		1.1229				$Q_s = 10.977Q_l^{1.1719} \dots\dots(1)$

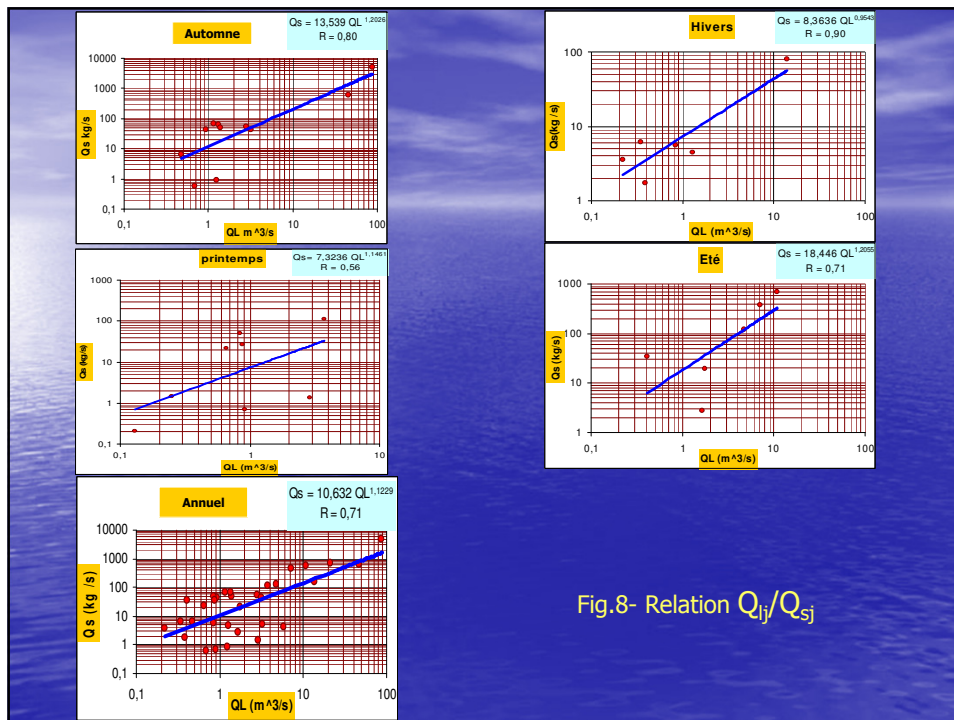


Fig.8- Relation Q_{ij}/Q_{sj}

Tab.9- Estimation de la charge solide

S/Bassin	Rbôa	Timgad	Morri	Bassin versant
Méthodes				
Tixeront	211.02	200.85	202	206.26
Sogreah	633.48	611.32	613.83	623.16
Fournier	382.94	281.43	229.17	360.98
Gavrilovich	628.04	520.74	370.78	613.82
Données mesurées	536.9	429.46	368.6	481.33

- Ainsi le débit solide moyen annuel est estimé à **8.96 kg/s**, correspondant à une ablation spécifique globale de : **481.33 t/km²/an**.
- La question fondamentale à laquelle il est nécessaire de répondre est : **Quels sont les secteurs de ce bassin qui participent le plus à cette charge solide ?**
- Pour répondre, il fallait aborder le phénomène en terme d'**érodibilité** et sa répartition spatiale, autrement dit la **vulnérabilité** à l'érosion.
- Si la cartographie de l'érosion à l'échelle d'un petit bassin versant peut se faire à l'aide d'observations directes sur le terrain, à l'échelle d'une unité physique importante, la cartographie relève de modélisation.

- A l'aide des équations empiriques USLE, Fournier, Arlandus et Fournier(1960), et leur spatialisation, nous avons élaboré une carte du risque érosif pour le bassin versant de Timgad qui nous offre la possibilité d'estimer les quantités de sols pouvant être détachées annuellement dans un secteur donné (Tab.11).
- De ce fait, il est possible de localiser les secteurs de forte érosion nécessitant une intervention prioritaire.

Tab.10- Résultats du calcul des indices d'érosivité IP, IF, IFA et R (1975 -2002)

S/Bassin \ Indices	IF	IFA	R
Rbôa			
Timgad			
Morri			
Bassin versant			

- Malgré une corrélation significative entre l'érosion et la hauteur des pluies et érosion/Altitude dont l'impact est assez important, il existe cependant d'autres paramètres qui ont une influence capitale sur l'érosion tels que la lithologie, la pente et le couvert végétal, qu'il fallait prendre en considération dans l'élaboration de la carte de synthèse d'érodibilité du bassin (Fig.8).

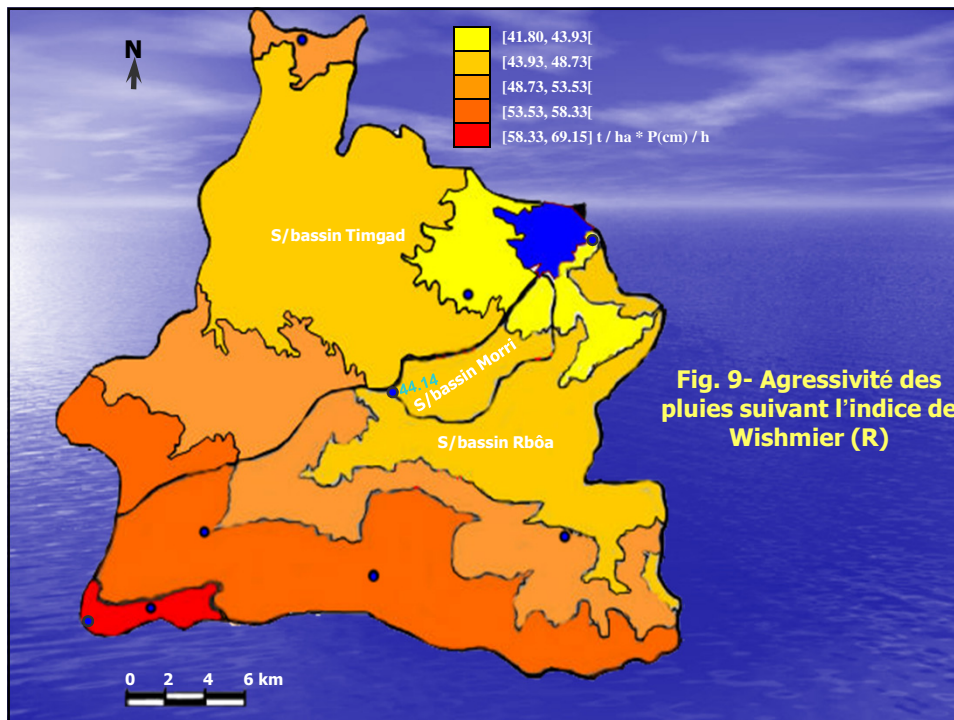


Fig. 9- Agressivité des pluies suivant l'indice de Wisniewski (R)

Modélisation : P_{jmax} , Q_{Ljmax} et Q_{sjmax}

- Dans le but de mettre en place un système d'alerte pour la protection du barrage contre l'envasement, nous avons essayé d'élaborer un modèle qui permet sur la base de la relation P_{jmax}/Q_{Ljmax} d'évaluer les Q_{sjmax} en relation avec les P_{jmax} selon la démarche suivante.
- Les relations déduites seront à partir des valeurs logarithmiques des Q_{Ljmax} et P_{jmax} , elle sera de la forme :

$$Q_{sj} = a Q_{Lj}^b \dots\dots\dots(1)$$

$$Q_{Lj} = a P_{jmax}^b \dots\dots\dots(2)$$

$$Q_{sj} = a (a P_{jmax}^b)^b$$

$$Q_{sj} = a (0,0319 P_{jmax}^{1,7886})^b$$

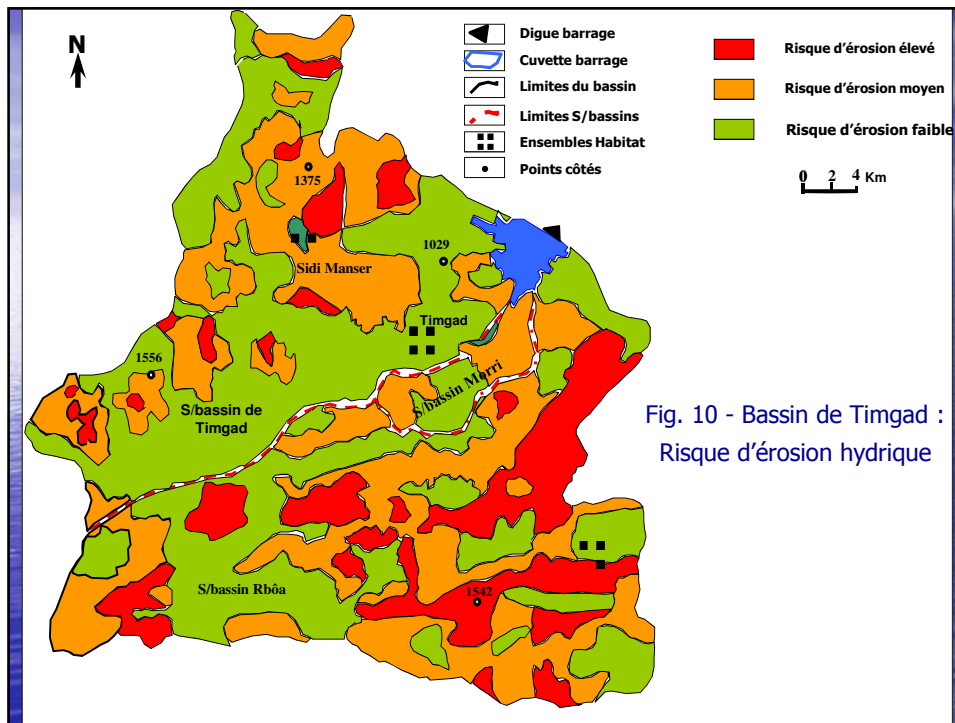
$$Q_{sjmax} = 10.632 * (0.0319 P_{jmax}^{1.7886})^{1.1229}$$

- En application de ce modèle on obtient les estimations suivantes :

Tab.11 - Estimation Q_{sjmax} en relation avec P_{jmax} récurrentielles

Fréquence	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.999
Récurrance	2	5	10	20	50	100	1000
U. Gumbel	0.37	1.5	2.25	3	3.9	4.55	6.9
P_{jmax} (mm)	17.94	41.43	57.02	72.61	91.32	104.83	153.69
Q_{Ljmax} (M³/s)	37.74	52.54	62.36	72.18	83.96	92.47	123.24
Q_{sjmax} (kg/s)	73.23	393.33	747.06	1213.89	1923.43	2537.58	5471.92
TSS (t/km²/j)	21.33	114.6	217.66	353.42	560.41	739.35	1594.31

- A partir de ces résultats et en conformité avec les autres critères physiques (lithologie, pente, couvert végétal ...etc.) il a été possible de dresser une carte d'érodibilité de l'ensemble du bassin. Celle-ci peut constituer un outil d'aide à la décision en terme de protection du bassin et du barrage pour une meilleure pérennité et une meilleure protection du milieu (Fig.9).



Conclusion

- Le bassin de Timgad de par sa situation géographique et climatique et eu égard de ses caractéristiques physiques est soumis à une dynamique érosive importante.
- Par ailleurs la localisation d'enjeux socio-économiques importants en l'occurrence le barrage de Koudiet M'douar et ces équipements annexes augmente d'avantage sa sensibilité et sa fragilité à l'égard des sollicitations pluviométriques à caractère agressif.
- L'évaluation quantitative et sa modélisation ont permis de mettre en évidence la répartition spatio-temporelle de l'érodibilité du bassin et de l'envasement du barrage.
- Ces modèles pourrait constituer des outils de gestion du risque d'érosion et d'envasement en terme de prévision, de prévention et de protection.

