

**QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION  
PAR ANALYSE STATISTIQUE : CAS DU BASSIN VERSANT DE  
MOUILLAH**

**QUANTIFICATION OF SUSPENDED SEDIMENT YIELD BY  
STATISTICAL ANALYSIS: THE CASE OF MOUILLAH  
WATERSHED**

**Hamid BOUCHELKIA.** Université de Tlemcen, h\_bouchelkia@yahoo.fr,

**Fadila BELARBI.** Université de Tlemcen. fabelarbi@yahoo.fr

**Boualem REMINI.** Université de Blida, reminib@yahoo.fr

**RESUME :** L'étude consiste à évaluer le transport solide en suspension dans le bassin de l'oued Mouillah (Tafna, Algérie). Le transport solide est un phénomène complexe. Les quantités de matières transportées sont très importantes et sédimentent dans les retenues d'eau. L'ampleur du phénomène est sans commune mesure en zones semi-arides. L'Algérie est un des pays les plus touchés par ce phénomène. Une méthode basée sur les débits moyens, facile à mettre en œuvre, a été mise au point pour l'estimation des apports solides. Elle est basée sur les données hydrométriques (débits liquides, concentration et débits solides) et les analyses saisonnières et annuelles, au droit de la station hydrométrique de Sidi Belkheir sur l'Oued Mouillah.

**Mots clés:** Bassin Versant, Oued Mouillah, Transport solide, Suspension, Statistique, Erosion

**ABSTRACT:** The study deals with the assessment of the solid transport in the wadi Mouillah watershed (Tafna, Algeria). Sediment transport is a complex phenomenon. The quantity of sediment transported is very important, and it fill in the reservoirs. The scale is out of proportion in semi-arid areas. Algeria is one of the countries most affected by this phenomenon. A simple method, based on average discharges, easy to implement, has been developed for estimating the sediment yield. It is based on hydrometric data (liquid flow, concentrations and sediment discharges) and seasonal and annual analysis of Sidi Belkheir station at the outlet of the wadi Mouillah watershed.

**Keywords:** Watershed, Oued Mouillah, Sediment transport, Suspension, Statistics, Erosion

## PROBLEMATIQUE

L'Algérie est un pays semi-aride à aride (200 à 400 mm de pluie par an) et les ressources en eau renouvelables sont faibles, irrégulières, et localisées dans la bande côtière. A cet effet, l'Agence Nationale des barrages et des Transferts (ANBT) a réalisé jusqu'à aujourd'hui, environ 60 grands barrages d'une capacité de 6 milliards de m<sup>3</sup>. Mais avec un taux d'érosion spécifique annuel se situant entre 2000 et 4000 t/km<sup>2</sup> (Demmak, 1982), l'infrastructure hydraulique algérienne est amputée annuellement d'une capacité de 45 millions de m<sup>3</sup> (Remini, 2004 ; Remini *et al.*, 2009) suite à l'envasement. Mais les problèmes posés par l'érosion et le transport solide peuvent atteindre une ampleur susceptible de combler les retenues de sédiments et ainsi de stériliser complètement les efforts d'aménagement des eaux et des rivières (Achite & Meddi, 2004, 2005).

Devant l'importance que revêt ce problème, et afin de permettre une réponse rapide à la demande des ingénieurs pour la quantification du transport solide en suspension à l'exutoire d'un bassin versant, une méthode simple et facile à mettre en œuvre a été mise au point. Le principe adopté est basé sur des données hydrométriques des stations de jaugeage, et des analyses saisonnières et annuelles, et a permis de définir une méthode appropriée d'estimation des apports solides.

C'est dans ce sens, que s'inscrit cette étude qui consiste à évaluer le transport solide en suspension dans le bassin de l'oued Mouillah au sein de la Tafna.

## PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET COLLECTE DES DONNEES

### Zone d'étude

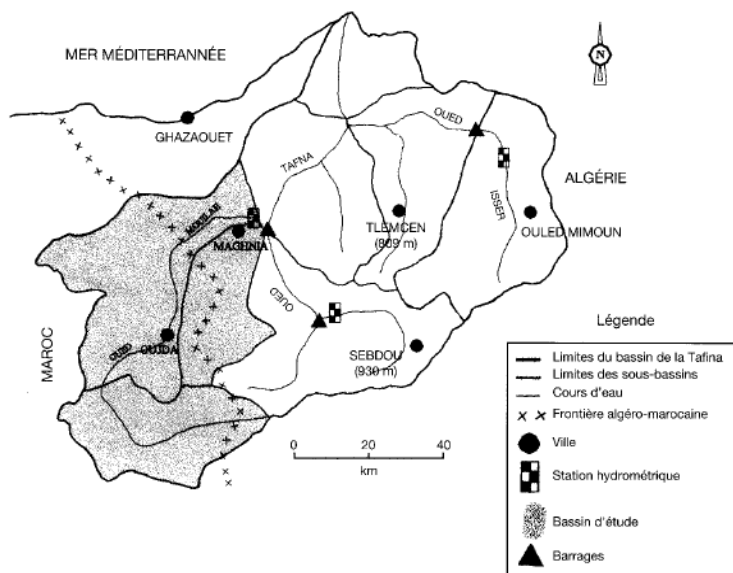
Le bassin versant de l'oued Mouillah est situé à l'extrême nord-ouest de l'Algérie au sud-ouest de la wilaya de Tlemcen. Il s'étend à l'intérieur d'un périmètre de 230 km et occupe une superficie de 2650 km<sup>2</sup> dont la majeure partie se trouve sur le territoire marocain couvrant les plaines des Angads et de Maghnia (fig.1). Le relief, assez varié, est constitué de zones de montagnes, de plaines et de vallées. Il est drainé par l'oued Mouillah qui prend naissance sur le territoire marocain sous le nom de l'oued Bounai. A son entrée en Algérie (vers Maghnia), il prend le nom d'oued Mouillah. La longueur du thalweg principal est de 124 km (Bouanani, 2005). Ce bassin versant occupe une grande partie de la plaine de Maghnia, mais aussi une partie des monts de Traras. Ses pentes sont en général très accentuées dépassant les 20% au niveau des montagnes des Traras au nord-ouest et les monts de Tlemcen au sud. Entre ces zones à relief fort, des pentes plus

douces (entre 0 et 10%) sont localisées de part et d'autre de l'oued Mouillah constituant la plaine de Maghnia (Belarbi, 2010).

Les sols du bassin sont constitués par :

- les sols calcaires qui longent l'oued Mouillah et se prolongent au nord-est des monts des Traras et aux piémonts de Tlemcen où généralement une végétation herbacée y est présente.
- Les sols calciques : caillouteux et peu profonds, se développent surtout le long de la vallée de l'oued Mouillah.
- Les sols alluviaux constitués principalement de sols calcaires lourds recouvrant les basses terrasses et les lits des oueds sont localisés au nord de la plaine de Maghnia.
- Les sols rouges à encroûtement: ces sols formés de marnes du Miocène, couvrent une grande partie de la plaine de Maghnia où une culture extensive irriguée est rencontrée.

La moitié de la superficie du bassin de l'oued Mouillah est constituée de terrains nus, localisés au sud (fig. 2). Ces terrains susceptibles d'être arrachés par l'effet de pluies violentes, correspondent à une zone plate à pente inférieure à 5%. L'autre partie du bassin se trouve suffisamment couverte pour résister aux menaces érosives (Bouanani, 2005). Ce bassin est contrôlé par la station de jaugeage de Sidi Belkheir (Code 160504).



**Fig. 1** Bassin de Mouillah (Terfous *et al.*, 2001)

**Données**

La collecte des données, fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) consiste en un dépouillement systématique des paramètres: hauteur d'eau et concentration en particules solides prélevées au droit de la station de Sidi Belkheir contrôlant le bassin versant de l'oued Mouillah. Les données sont représentatives et couvrent une période allant de 1974/75 à 1999/00 soit 25 années d'observations pour les débits liquides. Ceci a motivé le choix de l'utilisation d'une série complète sans lacune de débit moyens mensuels au lieu d'une série de débits moyens journaliers avec la possibilité d'utiliser des séries très longues plus significatives dépassant la trentaine d'années, et sur une période de 11 ans (1989/90-1999/00) pour les couples débits liquide et solide (Q, Qs). Les données de l'ANRH sont fournies en deux fichiers : i) celui des débits moyens journaliers sans lacunes à partir duquel le fichier des débits moyens mensuels est élaboré, ii) celui des débits moyens liquides instantanés et des concentrations solides instantanées observés par les services de l'ANRH sur la période 1974/75-1999/00 d'où le fichier des couples débit liquide/débit solide exprimés en débit moyen journalier est élaboré.

## **METHODOLOGIE**

Elle consiste en :

- Collecte des données contribuant au phénomène (débits liquides Q, concentrations solides) ;
- Un traitement statistique et informatique de ces données ;
- Détermination des modèles adéquats  $Q_s = F(Q)$  entre débits liquides et débits solides ;
- Etude des régimes des débits liquides du cours d'eau par analyse fréquentielle (courbes des débits classés) ;
- Estimation de la masse des sédiments en suspension par combinaison entre le modèle  $Q_s = F(Q)$  et la courbe des fréquences cumulées des débits liquides. (UNESCO, 1989).

## **EVALUATION DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION**

L'estimation de la masse des sédiments en suspension se fait selon les étapes suivantes :

- Division de la courbe de fréquence cumulée des débits liquides en plusieurs intervalles de fréquences  $[f_i, f_{i+1}]$  ;
- Détermination des débits liquides atteints ou dépassés  $Q_i$  correspondant à la médiane de chaque intervalle de fréquence ;

- Pour chaque débit liquide  $Q_L$ , le débit solide  $Q_{Si}$  est calculé en utilisant le modèle statistique  $Q_S=f(Q)$  ;
- Evaluation du débit solide moyen inter annuel par la relation (1). (Bouchelkia, 2003 ; Bouchelkia, 2009).

$$Q_{sm} = \sum_{i=1}^n Q_{Si} \cdot (f_{i+1} - f_i) \tag{1}$$

### APPORTS SOLIDES DANS LE BASSIN VERSANT DE MOUILLAH

Pour la station de Sidi Belkheir, des applications aux échelles annuelle et saisonnière ont été menées. Compte tenu de l’influence saisonnière sur le phénomène du transport solide, des relations saisonnières entre débits liquides et débits solides sont établies avec l’estimation de l’apport solide en suspension pour chaque saison. Deux groupements de saisons ont été effectués, le premier, selon les saisons conventionnelles (Automne, Hiver, Printemps et Été), le second, selon le partage de l’année en deux saisons (humide et sèche) identifiées suite à la construction du diagramme ombrothermique de la station de Maghnia, se trouvant à l’intérieur du bassin versant (fig. 2). La saison humide s’étend de Novembre à Avril et la saison sèche de Mai à Octobre. Le choix d’utilisation des données a porté sur cette station plutôt que celles de la station de Sidi Belkheir pour une meilleure représentativité du bassin versant.

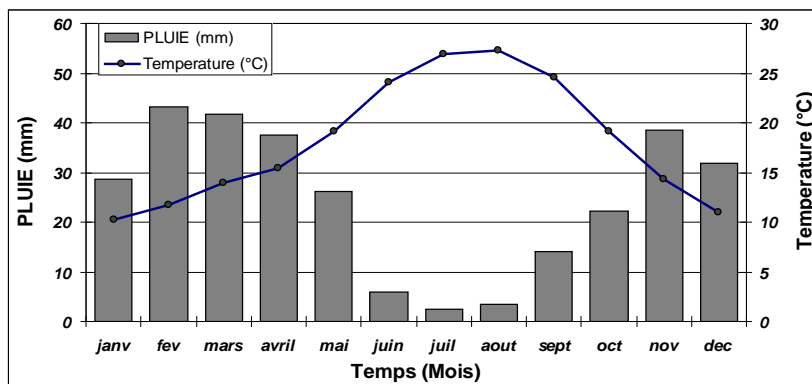


Fig.2 Diagramme ombrothermique de la station de Maghnia, période 1978-2000.

**Tableau 1.** Relations débit liquide/débit solide et coefficients de corrélation :  $Q_s = K Q^A$ 

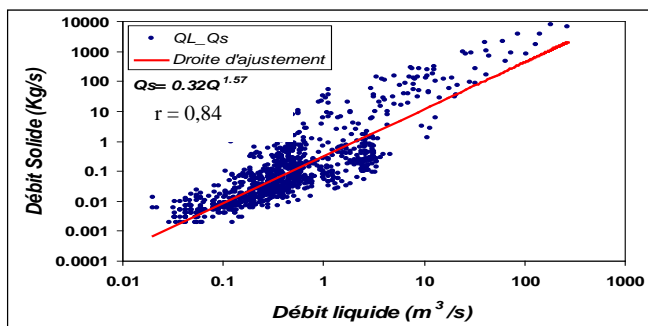
Période	Taille	Coefficients		Coef. corrélation	Relation
		A	K		
Annuel	1124	1,57	0,32	0.84	$0,32Q^{1,57}$
Automne	355	1,72	0,33	0.81	$0,33Q^{1,72}$
Hiver	302	1,73	0,32	0.89	$0,32Q^{1,73}$
Printemps	252	1,38	0,28	0.87	$0,28Q^{1,38}$
Eté	215	1,70	0,42	0.88	$0,42Q^{1,70}$
Saison humide	606	1,63	0,34	0.84	$0,34Q^{1,63}$
Saison sèche	516	1,54	0,30	0.87	$0,30Q^{1,54}$

**Tableau 2.** Relations débit liquide-concentration solide et coefficients de corrélation

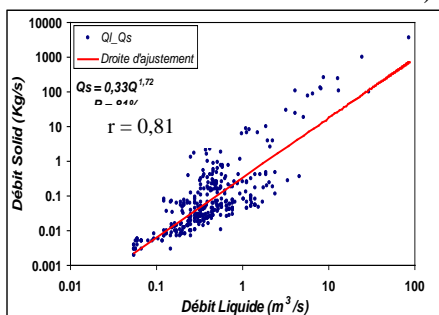
Période	Taille	Relation	Coef. corrélation
Annuel	1124	$0,32Q^{0,57}$	0.50
Automne	355	$0,33Q^{0,72}$	0.60
Hiver	302	$0,32Q^{0,73}$	0.63
Printemps	252	$0,28Q^{0,38}$	0.46
Eté	215	$0,42Q^{0,70}$	0.60
S Humide	606	$0,34Q^{0,63}$	0.51
S Sèche	516	$0,30Q^{0,54}$	0.52

Plus de 300 données de débits liquides moyens mensuels et 1146 couples (Q, Q<sub>s</sub>) sont sélectionnés sur la période 1974/75-1999/00. Ces couples sont des débits moyens journaliers aussi bien pour les débits liquides que pour les débits solides. Il est à signaler que la série des débits liquides moyens mensuels est une série continue sans lacune, mais la série des couples (Q, Q<sub>s</sub>) doit être aussi longue que possible mais pas nécessairement continue.

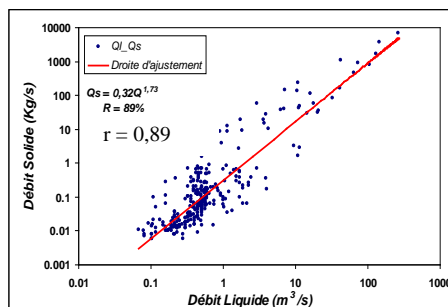
Les débits liquides sont enregistrés à la station hydrométrique de Sidi Belkheir et les concentrations solides sont obtenues après analyse au laboratoire de l'ANRH des échantillons d'eau prélevés à la station. Ces prélèvements sont quotidiens avec multiplication du nombre de prélèvements en période de crues. La figure 3 représente les relations annuelles et saisonnières des débits solides en fonction des débits liquides.



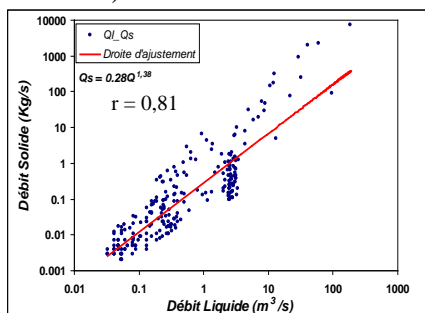
a) Annuel



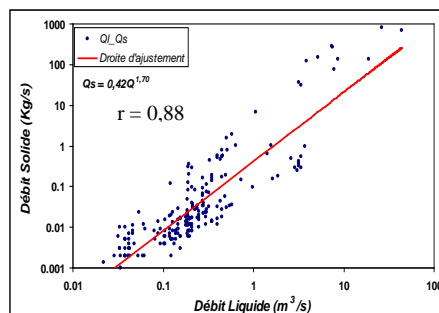
b) Saison d'automne



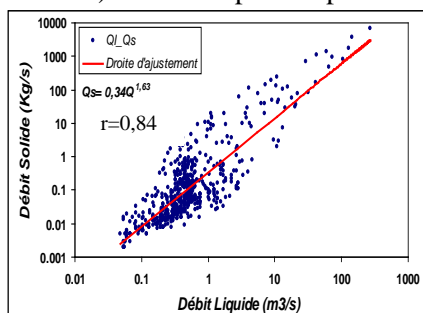
c) Saison d'hiver



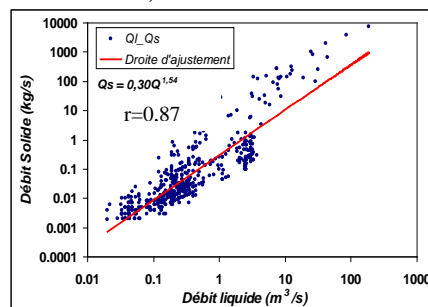
d) Saison de printemps



e) Saison d'été

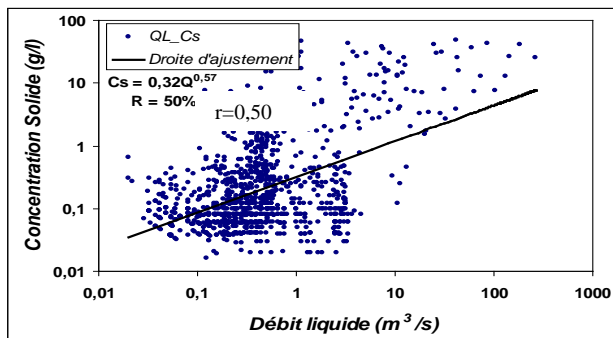


f) Saison humide

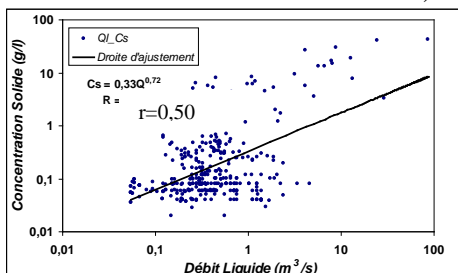


g) Saison sèche

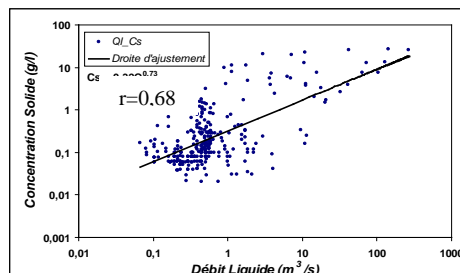
**Fig.3.** Corrélation annuelle et saisonnière entre débit solide et débit liquide.



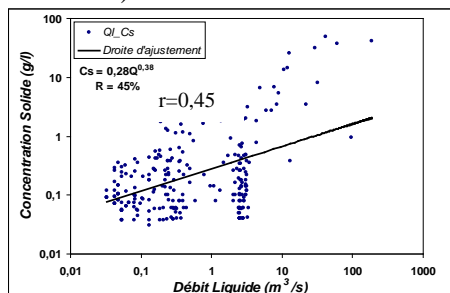
a) Annuel



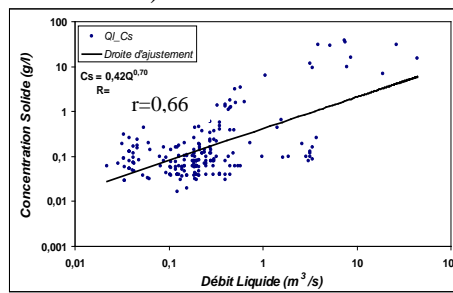
b) Saison d'automne



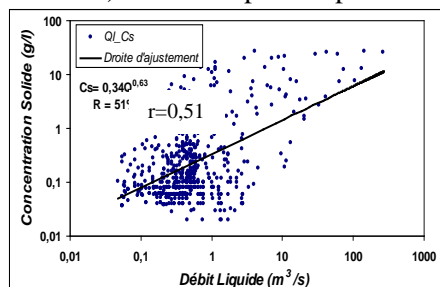
c) Saison d'hiver



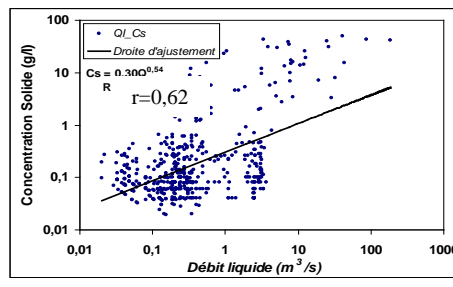
d) Saison de printemps



e) Saison d'été



f) Saison humide



g) Saison sèche

**Fig.4.** Corrélations annuelle et saisonnière entre concentration solide et débit liquide.



Il est intéressant de constater que le nuage de points prend la forme d'une corrélation puissance :  $Q_s = K \cdot Q^A$ , avec K et A : coefficients. Le tableau 1 résume bien les différentes relations et les coefficients de corrélation obtenus. Notons que les relations sont très significatives du fait des coefficients de corrélation élevés pour toutes les corrélations (entre 0.81 et 0.89). De même, des relations directes sont recherchées entre les paramètres initiaux, c'est-à-dire entre débit liquide et concentration solide (Q, Cs), car la relation précédente combine deux fois les débits ; les résultats obtenus sont représentés en figure 4 où le nuage de points dans toutes les applications est plus dispersé, ce qui bien exprimé par les coefficients de corrélation relativement faibles (entre 0.45 et 0.63) obtenus dans le tableau 2. Malgré le biais existant dans la relation entre débits, le choix a porté sur l'utilisation des corrélations entre débit liquide et débit solide dans cette étude, en attirant l'attention sur le risque de surestimation de la qualité de la relation entre les deux variables.

#### Etude fréquentielle des débits liquides

La répartition statistique des observations en classes a permis de tracer les courbes des débits classés (fréquences cumulées des débits liquides moyens mensuels) pour les périodes considérées. Les courbes obtenues sont regroupées dans la figure 5. Le tableau 3 résume les moyennes et les écarts type des débits moyens mensuels pour chaque période.

**Tableau 3.** Moyenne et écart type des débits moyens mensuels

Période	Taille de l'échantillon	Moyenne	Ecart type
Annuel	300	1,59	3,05
Automne	72	1,73	3,88
Hiver	72	1,82	4,21
Printemps	72	0,97	0,94
Eté	72	0,79	0,96
Saison Humide	144	1,78	3,48
Saison Sèche	144	1,21	1,62

#### Estimation des Apports solide en suspension de bassin versant de Mouillah

Le modèle  $Q_s = K Q^A$  combiné avec la courbe des débits classés suivant les étapes énumérées précédemment, a permis d'évaluer le débit solide moyen en suspension interannuel. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.

Tous les résultats (corrélations débit liquide–débit solide, étude fréquentielle des débits liquides et estimation des apports solides en suspension) sont obtenus grâce un programme développé au laboratoire.

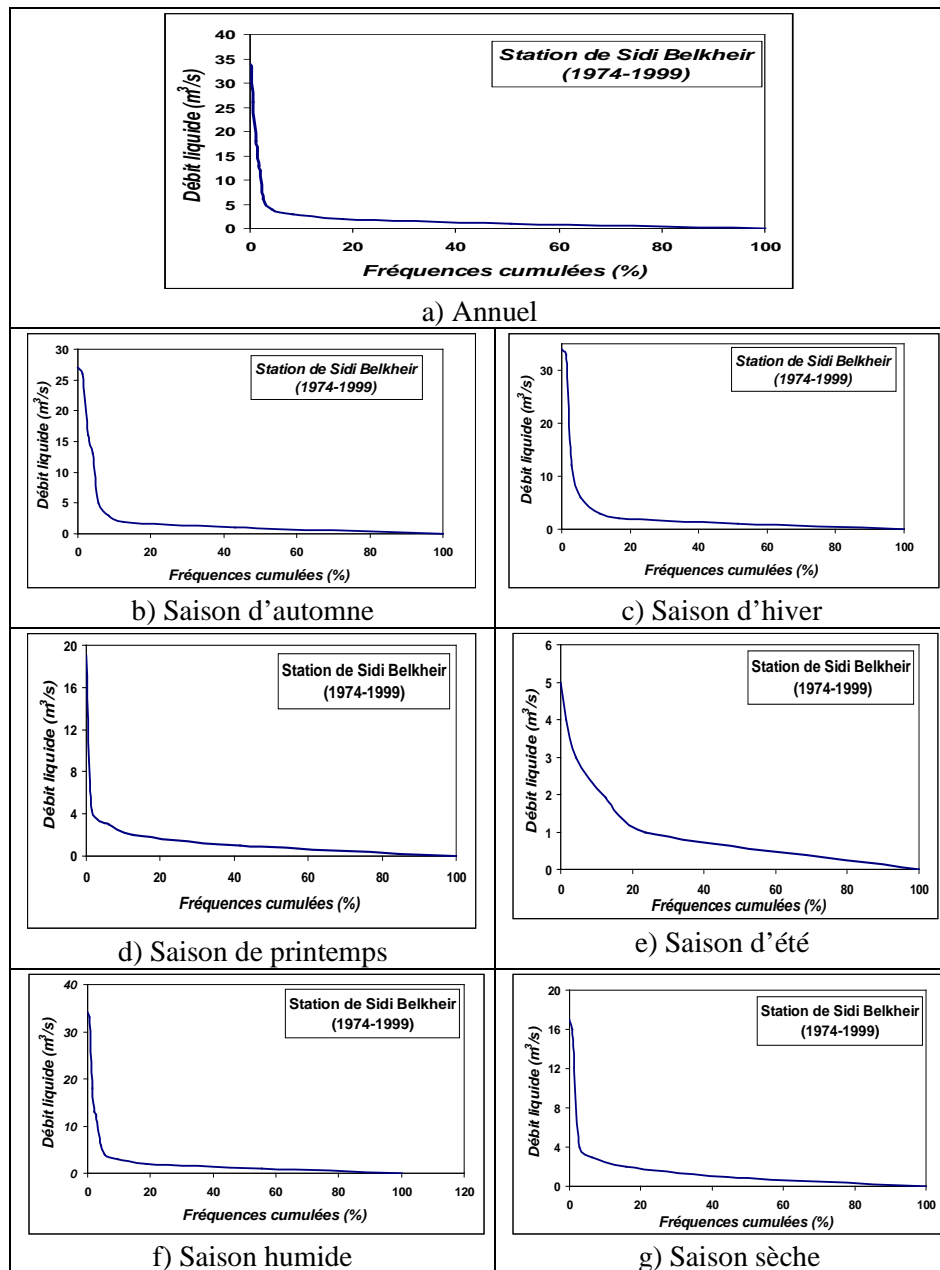
**Tableau 4.** Apports solides dans le bassin versant de l’oued Mouillah

Période	Annuel	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Saison humide	Saison sèche
Débit liquide moyen journalier (m <sup>3</sup> /s)	1,69	1,94	2,18	1,22	0,92	1,94	1,39
Concentration Spécifique (g/l)	0,85	1,70	1,77	0,38	0,58	1,17	0,7
Débit solide en suspension (kg/s)	1,44	3,31	3,85	0,46	0,53	2,28	0,8
Apport solide (10 <sup>4</sup> t/Période)	4,54	2,61	3,04	1,46	0,42	3,60	1,26
Apport solide annuel (10 <sup>4</sup> t/an)	4,54	7,53				4,86	
Dégradation spécifique (t/km <sup>2</sup> .an)	17,73	28,41				18,34	

## DISCUSSIONS DES RESULTATS

Les résultats des modèles d’ajustement débit solide-débit liquide sont assez significatifs, puisque le coefficient de corrélation varie entre 0.81 et 0.89 (tableau 1) pour toutes les applications. Le coefficient de corrélation pour le modèle annuel est significatif, il est de 0.84 (tableau 1), par contre à l’échelle saisonnière, le coefficient de corrélation est beaucoup plus important pour les saisons : automne, printemps, été et saison sèche puisqu’il est respectivement de 0.81, 0.89 ,0.87 et 0.87. Il est à remarquer, que le plus faible coefficient est enregistré en automne ; ceci peut s’expliquer par la régularité des apports et à l’intervention importante des premières crues durant cette saison. Dans l’ensemble, l’influence des saisons sur le phénomène est visible. A l’échelle de deux saisons (humide et sèche), le degré de signification est très important au vu des coefficients de corrélation obtenus, 0.84 et 0.87, ce qui confirme l’influence des saisons sur

le phénomène du transport solide. Les liaisons débit liquide-débit solide restent en général significatives.



**Fig.5** Courbe des fréquences cumulées des débits liquides moyens mensuels aux échelles annuelle et saisonnière.

La dégradation spécifique annuelle du bassin versant de Mouillah paraît faible et pourtant soumise à des conditions physiques et climatiques très variables (entre 17,73 et 28,41 t/km<sup>2</sup>), valeur annuelle inférieure au résultat trouvé par Terfous *et al.* (2001) pour le même bassin versant (126 t/km<sup>2</sup> sur une période d'étude entre 1977 à 1993), mais signalons que leur estimation ne tient pas compte des fréquences des débits liquides, elle est nettement inférieure aux résultats trouvés dans une étude antérieure (Bouchelkia et Benhadj, 1994) sur le bassin versant de la Tafna (entre 197 et 255 t/km<sup>2</sup>.an) dont il fait partie, et même très loin de la valeur de dégradation spécifique obtenue par Megnounif *et al.* (2003) sur un sous-bassin de la Tafna sur 5 ans d'observation (1120 t/km<sup>2</sup>.an). Ceci est dû à l'importance de la couverture végétale dans le bassin versant en question et du fait de débits relativement faibles de l'oued Mouillah (affluent de l'oued Tafna).

Il est à signaler qu'en hiver les apports solides sont plus importants (3,04.10<sup>4</sup> tonnes), car en cette saison les débits liquides sont plus élevés et les crues plus fréquentes qu'aux autres saisons.

## CONCLUSION

Cette approche permettra aux projeteurs et aux gestionnaires d'ouvrages de mobilisation d'eau de mieux estimer le transport solide et de prédire les pertes de capacité.

Elle a permis de quantifier le transport solide en suspension au droit de la station de Sidi Belkheir contrôlant le bassin versant de l'oued Mouillah, sur la période 1974/75-1999/00. L'estimation a été basée sur des débits liquides moyens mensuels et moyens journaliers des couples débits liquides-débits solides (pour le modèle  $Q_s=F(Q)$ ), enregistrés durant la période étudiée.

Les résultats obtenus ont montré que les apports solides les plus abondants et réguliers sont en hiver. Ils attestent bien que le bassin versant de l'oued Mouillah est d'une érodabilité modérée, puisque la valeur maximale annuelle des apports solides trouvée est de 7.53 10<sup>4</sup> t. Dans une application, les résultats présentent une certaine dispersion, toutefois l'importance et la nature de l'ouvrage projeté sera déterminante dans le choix de l'application. Une confrontation du dernier projet avec les mesures sur le terrain et expérimentales, permettra de faire le meilleur choix.

La méthode développée peut être utilisée comme un moyen simple et directement applicable pour l'estimation des apports solides sur tous les bassins versants algériens, qu'il faut compléter par une estimation de la dispersion des résultats en terme de concentration.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Achite, M & Meddi, M. (2004) *Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Haddad (Nord Ouest Algérien)*. Sécheresse, 15(4), 367-373.
- Achite, M. & Meddi, M. (2005) *Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride, cas du bassin versant de l'oued Mina (Nord Ouest Algérien)*., Revue des Sciences de l'Eau 18/Spécial, 37-56.
- Belarbi, F. (2010) *Etude de la pluviométrie journalière dans le bassin versant de la TAFNA*. Mémoire de magister en hydraulique, Dpt d'hydraulique, Univ. Tlemcen, Algérie.
- Bouanani, A. (2005) *Hydrologie, transport solide et modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie)*. Thèse de doctorat en Géologie appliquée. Option Hydrogéologie, Département d'hydraulique, Université de Tlemcen, 250 p.
- Bouchelkia, H. (2003) *Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif*. Ingénieries n°33, 45-56 (mars 2003).
- Bouchelkia, H. (2009) *Etude du transport solide dans le bassin versant et son impact sur l'envasement des barrages – cas du bassin versant de Chellif*. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie.
- Bouchelkia, H. & Benhadj, M.O. (1994) *Contribution à la modélisation statistique des transports solides en suspension*. Mémoire d'ingénieur en Hydraulique, Ecole nationale polytechnique d'Alger, 116 p.
- Demmak, A. (1982) *Etude sur l'érosion et le transport solide*. Thèse de doctorat ingénieur, Univ. de Paris, France.
- Megnounif, A., Terfous, A. & Bouanani, A. (2003) *Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute Tafna (Nord ouest Algérien)*. Revue des Sciences de l'Eau, 16(3), 369-380.
- Remini, B. (2004) *Sédimentation des barrages en Algérie*. La Houille Blanche. n°1, janvier.
- Remini, B., Hallouche, W. & Achour, B. (2009) *L'Algérie : plus d'un siècle d'envasement des barrages*. Chapitre 8). In : Etat des ressources en eau au Maghreb, chapitre 8, (UNESCO Office in Rabat, Ed.), 123-142.
- Terfous, A., Megnounif, A. & Bouanani, A. (2001) *Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouilah (Nord ouest Algérien)*. Revue des Sciences de l'Eau, 14(2), 173-185.
- UNESCO (1989) *Problème d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants*. In : Projet 5.3 du programme hydrologique international (Saubarg A., Ed.; White W.R., directeur de la publication).

&amp;&amp;&amp;