

Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif

Hamid Bouchelkia^a et Boualem Remini^b

Afin d'améliorer les connaissances en matière de transport solide dans les cours d'eau et de mieux cerner la problématique de l'envasement des barrages, les auteurs de cet article commentent l'étude qu'ils ont conduite dans un bassin versant du Nord Ouest algérien. Une analyse statistique d'échantillons a permis l'évaluation du transport solide en suspension à l'exutoire du bassin, à partir des débits liquides moyens journaliers.

La conséquence la plus dramatique de l'érosion des bassins versants et du transport solide est sans aucun doute l'envasement des barrages. Actuellement, il y a un cumul de dépôt de vase de plus de $650 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ dans plus de 110 barrages algériens. Plusieurs techniques de lutte contre ce phénomène ont été expérimentés dans de nombreux sites, mais sans avoir de bons résultats. Cet échec est dû surtout à la non-maîtrise du mécanisme de l'envasement et à la quantité de matériaux solides transportée dans les cours d'eau et plus particulièrement la fraction solide entrante dans les retenues. Devant l'importance de ce problème et le manque de données, la quantification du transport solide s'avère indispensable. C'est dans ce sens que s'inscrit cette étude qui consiste à évaluer le transport solide en suspension à l'exutoire du bassin versant de Chellif, considéré comme le plus grand bassin et l'un des plus érodés en Algérie. Cette estimation du transport solide en suspension se fait à partir des débits liquides uniquement.

Notre objectif est de fournir les informations indispensables pour mieux connaître la durée de vie de nos barrages et définir le dimensionnement des ouvrages futurs. Dans l'immédiat, notre préoccupation n'est donc pas de procéder à une estimation d'apport pour un ou plusieurs événements (crues), néanmoins dans nos travaux futurs nous tenterons d'évaluer le transport solide par des crues séparées mais pour des bassins versants ayant une production très importante en période de crues.

Notre étude s'intéresse au transport solide en suspension transitant par les stations de jaugeages, car il est le plus important en quantité que le transport par charriage, et c'est lui qui affecte les ouvrages hydroélectriques et dépend de la fiabilité des données utilisées. Ce travail ne prétend pas couvrir tous les problèmes du transport solide et l'interprétation du fonctionnement des crues, l'étude du transport solide par analyses des courbes d'hystérésis (solidogramme) à l'échelle des crues fait partie de nos ambitions dans le futur.

Présentation de la zone d'étude et collecte des données

Situé au nord-ouest de l'Algérie, le bassin du Chellif présente une superficie de $43\,700 \text{ km}^2$, dont la quasi-totalité des sols sont des alluviaux constitués essentiellement d'éléments fins dérivés de marne ou d'argile, rendant le sol très sensible à l'érosion. Il est caractérisé par une altitude minimale de 20 m, une altitude maximale de 1 983 m, un périmètre de 1 383 km, son indice de compacité est de 1.85, la longueur de son rectangle équivalent est de 619 km, et la longueur de son talweg principal est de 759 m.

L'oued le plus important du bassin est le Chellif qui coule d'est en ouest depuis le barrage de Bougezoul jusqu'à la mer, sur une distance de 250 km avec une dénivellation de 625 m (figure 1, p. 46). Le bassin est soumis à un climat méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers frais et pluvieux, caractérisé par des vents de moins

Contact

a. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, BP 119 Tlemcen 13000, Algérie.

b. Université de Blida, BP 270 Blida 09000, Algérie.

de 10 km/h et un ensoleillement moyen élevé variant de 60 à 80 % de la durée du jour. La pluviométrie moyenne observée est indiquée dans le tableau 1 pour les stations d'El Khemis, Chlef et Relizane.

Les données utilisées dans notre article proviennent de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH), elles sont prélevées à la station de Sidi Belatar. Le mode de prélèvement appliqué consiste à faire des prélèvements quotidiens d'échantillon d'eau analysés au laboratoire pour déterminer les concentrations en matières solides et autres caractéristiques. Le prélèvement est donc ponctuel avec multiplication du nombre de prélèvements en période de crues ou à débit variable (prélèvement chaque pas de temps restreint, 15 minutes par moment).

Évaluation 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 $[f_i, f_{i+1}]$, avec f_i la fréquence de débit ;

– détermination des débits liquides atteints ou dépassés, Q_i correspondant à la médiane de chaque intervalle de fréquence ;

– pour chaque débit liquide Q_i , on calcule le débit solide Q_{si} en utilisant le modèle statistique $Q_s = f(Q)$;

– évaluation du débit solide moyen inter-annuel par : $Q_{sm} = \sum_{i=1}^n (f_{i+1} - f_i)$.

L'organigramme général d'estimation des apports solides en suspension est représenté par la figure 2.

Nous utilisons deux types de fichiers :

– des fichiers de débit moyen journalier s'étalant sur une période de 24 ans complète sans lacune (1-série annuelle complète et continue, 4-série saisonnière complète et continue, 2-série semestrielle complète et continue) à qui nous appliquons le test d'homogénéité et que nous étudierons pour la détermination des tableaux des fréquences cumulées (analyse fréquentielle de débit liquide moyen journalier) ;

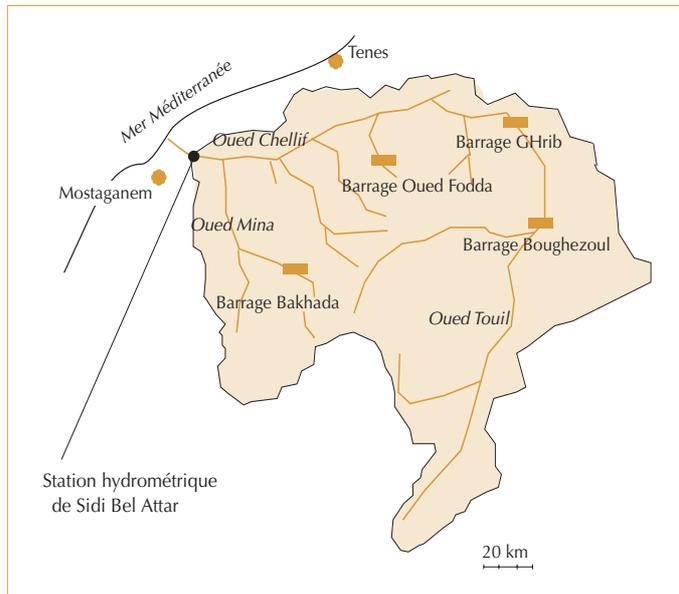
– des fichiers de couple de valeur (q, Q_s) dont Q sont des débits liquides et qui sont selon le mode d'estimation :

- Q : débits moyens journaliers au cas d'une estimation à partir des débits moyens journaliers,
- Q : débits instantanés enregistrés en période de crue au cas d'une estimation par analyse des crues.

Pour les tests utilisés dans cette étude, notre choix s'est porté sur le test de MAN-WHITE pour l'homogénéité et le test de WALD et WILFOTVITZ pour l'indépendance (cités par G. Saport dans son ouvrage *Analyse des données et statistiques*, édition Technip, 1990).

Les lettres a et b représentent les paramètres de la régression $y = ax + b$ avec $y = \log Q_s$ et $x = \log Q$. R est le coefficient de corrélation.

▼ Figure 1 – Le bassin versant du Chellif.



► Tableau 1 – Pluviométrie mensuelle moyenne (mm).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
El Khemis	76	59	49	48	35	13	9	3	15	54	49	69	472
Chlef	21	55	38	46	35	10	8	1	10	49	43	71	429
Relizane	44	43	39	44	30	10	1	1	15	32	33	49	347

Évaluation à partir des débits liquides moyens journaliers

Pour la station de Sidi Belater, nous avons établi des relations $Q_s = f(Q)$ durant les périodes suivantes : annuelle (1), automne (2), hiver (3), printemps (4), été (5), humide (6) et sèche (7). Plus de 6 312 de données de débits liquides moyens journaliers et 1 026 couples (Q_s, Q) sélectionnés sur la période 1972-1996. La figure 3 (p. 51) représente la relation annuelle du débit solide en fonction du débit liquide. Il est intéressant de constater que le nuage de points prend la forme d'une corrélation puissance :

$$Q_s = K \cdot Q^A \text{ (K et A sont des coefficients)}$$

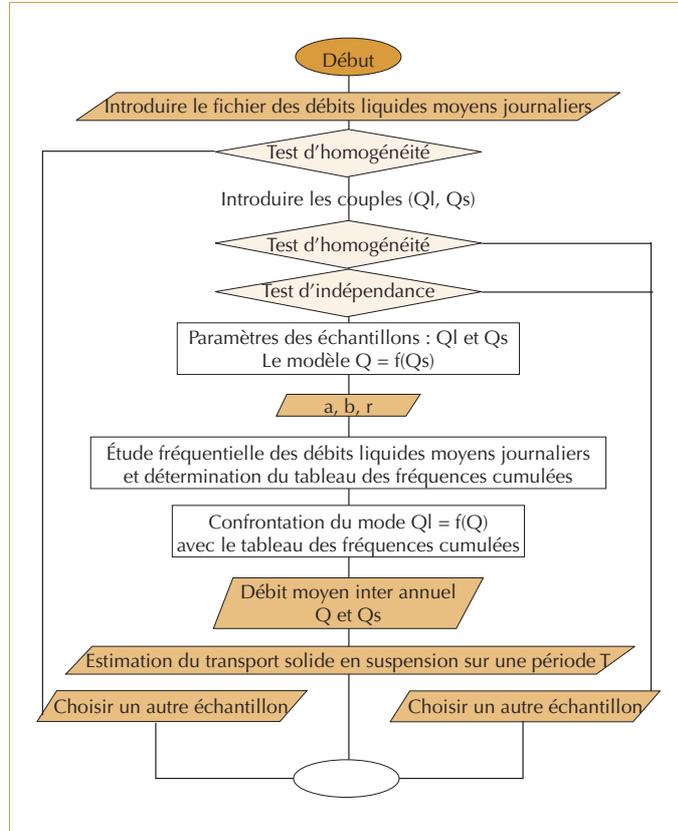
Les mêmes constatations peuvent être faites pour la figure 4 (a à d) (p.51) représentant quelque relations saisonnières entre les débits solides et liquides. Le tableau 2 résume bien les différentes relations saisonnières et les coefficients de corrélation.

ÉTUDE FRÉQUENTIELLE DES DÉBITS LIQUIDES

La répartition de la statistique d'observation en classes nous a permis de tracer les courbes des débits classés (fréquences cumulées des débits liquides moyens journaliers) pour les périodes annuelles (figure 5, p. 52) et quelques courbes saisonnières (figure 6 (a à d) p. 52). Le tableau 3 (p. 48) résume l'intervalle de confiance pour chaque période.

APPORTS SOLIDES EN SUSPENSION

Le modèle $Q_s = K Q^A$ combiné avec la courbe des débits classés, nous ont permis d'intégrer les débits



et leurs fréquences pour mieux évaluer le débit solide moyen en suspension inter-annuel. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 4 (p. 49).

▲ Figure 2 – Organigramme général d'évaluation des apports solides.

Période	Nombre de points	Coefficient A	Coefficient K	Coefficient de corrélation	Intervalle de prédiction	Relation
1	1 026	1,44	1,62	92 %	± 5,54	$1,62 \times Q^{1,44}$
2	360	1,88	0,91	94 %	± 4,61	$0,91 \times Q^{1,88}$
3	488	1,64	0,59	94 %	± 3,81	$0,59 \times Q^{1,64}$
4	258	1,57	1,07	91 %	± 6,54	$1,07 \times Q^{1,57}$
5	83	1,45	4,17	87 %	± 11,65	$4,17 \times Q^{1,45}$
6	725	1,58	0,95	93 %	± 4,53	$0,95 \times Q^{1,58}$
7	341	1,32	2,63	90 %	± 6,78	$2,63 \times Q^{1,32}$

1 = annuelle, 2 = automne, 3 = hiver, 4 = printemps, 5 = été, 6 = humide, 7 = sèche

◀ Tableau 2 – Différentes et coefficients de corrélation.

Évaluation à partir du débit de crue

Nous avons procédé à l'évaluation des apports solides en suspension au niveau de la station de Sid Bel Attar à partir de l'intégralité des crues et de la dissociation des crues.

Dans la période d'étude, nous avons sélectionné plus de 90 crues les plus importantes et les plus enregistrées (nombre important de prélèvements durant l'événement) que nous avons utilisé dans l'estimation.

Nous avons présenté une seule crue pour montrer l'évolution des concentrations, débit liquide et solide pendant la crue, et pour montrer que le comportement des débits solides en fonction du débit liquide est différent en montée ainsi qu'en descente de la crue.

Les 90 crues dont nous disposons sont de durée variant de 1 à 15 jours. Il est intéressant de signaler que nous ne disposons pas de toutes les données de transports solides lors des crues, et notamment les crues torrentielles, car le régime de Oued Chellif est très turbulent et torrentiel, ce qui rend la tâche de l'opérateur de la station difficile, vu les moyens mis à sa disposition.

À PARTIR DE L'INTÉGRALITÉ DES CRUES

Les relations débit solide en fonction du débit liquide ($Q_s = f(Q)$) ont été établies pour sept périodes repérées de la manière suivante dans les tableaux ci-après : annuelle (1), automne (2), hiver (3), printemps (4), saison humide (5) et saison sèche (6).

Les données disponibles sont insuffisantes pour la saison d'été ; les crues sont rares.

La figure 7 (p. 53) représente la corrélation annuelle du débit solide en suspension en fonction du débit liquide. Nous remarquons que le nuage de points prend la forme d'une fonction puissance :

$$Q_s = K Q^A$$

Les mêmes constatations peuvent être faites pour la figure 8 (a à d) (p. 53) qui représentent les relations saisonnières automne — saison humide et saison sèche — entre les débits solides et liquides.

Le tableau 5 résume les différentes relations et les coefficients de corrélation.

Le modèle $Q_s = K Q^A$ combiné avec la courbe des débits classés nous donne les résultats du tableau 6 (p. 51).

▼ Tableau 3 – Intervalle de confiance.

Période	Taille	Moyenne avec intervalle de confiance	Écart type avec intervalle de confiance
1	6 312	32,14 ± 1,91	77,47 ± 1,35
2	2 196	12,34 ± 1,23	29,5 ± 0,87
3	2 268	38,47 ± 3,1	75,27 ± 2,19
4	2 280	18,55 ± 2,45	59,69 ± 1,73
5	2 268	1,81 ± 0,01	2,04 ± 0,07
6	4 464	25,69 ± 1,73	58,96 ± 1,22
7	4 548	10,21 ± 1,25	43,12 ± 0,88

1 = annuelle, 2 = automne, 3 = hiver, 4 = printemps, 5 = été, 6 = humide, 7 = sèche

À PARTIR DE LA DISSOCIATION DE LA CRUE (LA MONTÉE ET LA DESCENTE)

La dissociation de la crue en montée et en descente peut avoir une influence considérable sur l'estimation du débit solide en suspension ; les concentrations en particules solides diminuent surtout pour les crues de longue durée (plusieurs jours), dû au lessivage constant du sol.

À titre d'exemple, la figure 9 (p. 54) montre l'hydrogramme et le turbidogramme de la crue du 2 au 5 février 1979 enregistrée au niveau de la station Sidi Bel Attar. Il est intéressant de constater la différence de comportement du débit solide en montée et en descente de la crue. Nous avons établi les corrélations annuelles et saisonnières entre les débits solides et liquides (figure 10 (a et b) p. 54 et figure 11 (a à d) p. 55). Le tableau 7 (p. 50) résume les différentes relations et coefficients de corrélation.

Les résultats obtenus des apports solides en suspension durant la montée et la descente de la crue sont représentés dans le tableau 8 (p. 51).

Discussion des résultats

Les résultats des modèles d'ajustement débit solide-débit liquide sont assez significatifs, puisque le coefficient de corrélation varie entre 87 % et 95 % (tableaux 2, p. 47, 5, p. 49, et 7, p. 50) pour toutes les applications. En ce qui concerne l'évaluation du débit solide à partir des débits liquides moyens journaliers, le coefficient de corrélation pour le modèle annuel est largement significatif, il est de 92 % (tableau 2, p. 47), par contre à l'échelle

▼ Tableau 4 – Apports solides dans l'oued Chellif.

Période	1	2	3	4	5	6	7
Débit liquide moyen journalier (m ³ /s)	32,44	12	39	19	2	26	10
Débit solide en suspension (kg/s)	475	543	582	345	14	405	114
Apport solide annuel (10 ⁶ t/an)	15		12				8
Taux d'érosion (t/km ² .an)	343		268				187
1 = annuelle, 2 = automne, 3 = hiver, 4 = printemps, 5 = été, 6 = humide, 7 = sèche							

saisonniers, le coefficient de corrélation est beaucoup plus important pour les saisons automne, hiver et humide, puisqu'il est respectivement 94 %, 94 % et 93 % (tableau 2, p. 47). Ceci peut s'expliquer par la régularité des apports durant ces saisons. Inversement, le coefficient de corrélation est beaucoup plus faible durant les saisons printemps, été et sèche. L'évaluation du débit solide à partir de l'intégralité de la crue, le coefficient de corrélation atteint 91 % à l'échelle annuelle, il est de 89 % à 92 % pour les relations saisonnières (tableau 5), ce qui explique l'influence des saisons sur le transport solide. La saison sèche est marquée par un faible coefficient de corrélation (89 %) ; les crues sont très rares et leur comportement est assez complexe et imprévisible.

À partir de la dissociation des crues (montée et descente), l'évaluation du débit solide est très

significative ; le coefficient de corrélation varie de 90 % à 95 % (tableau 7, p. 50), ceci peut être interprété par le fait que le problème est mieux cerné à l'échelle de l'événement. Toutefois nous signalons que l'estimation des quantités de sédiments en suspension aboutie à des résultats sensiblement semblables dans les deux dernières applications à l'échelle des crues (tableaux 6, p. 50 et 8, p. 51). Les résultats obtenus par les différentes applications paraissent énormes et se situent entre 8 10⁶ t/an et 38 10⁶ t/an (tableaux 4, 6, p. 50 et 8, p. 51), ce qui démontre bien l'érodabilité très élevée du bassin versant de Chellif. Le passage aux taux d'érosion malgré l'existence des barrages dans le bassin versant est entrepris juste pour montrer l'importance du transport solide et l'érosion dans ce bassin, ce qui le distingue comme un cas particulier de l'érosion en Algérie.

▼ Tableau 5 – Différentes corrélations.

Période	Nombre de points	Coefficient A	Coefficient K	Intervalle de prédiction	Coefficient de corrélation	Relation
1	683	1,02	32,36	3,11	90%	32,36 ^{1,02}
2	377	1,26	28,62	3,37	91%	28,62 Q ^{1,26}
3	397	1,19	11,13	3,10	92%	11,13 Q ^{1,19}
4	290	1,25	6,6	4,43	91%	6,6 Q ^{1,25}
5	544	1,15	17,65	3,38	91%	17,65 Q ^{1,15}
6	309	1,15	10,91	5,28	89%	10,91 Q ^{1,15}
1 = annuelle, 2 = automne, 3 = hiver, 4 = printemps, 5 = humide, 6 = sèche						

Conclusion

La mise au point d'un programme qui permet d'analyser statistiquement les échantillons recueillis par l'application des tests d'homogénéité et d'indépendance permettra au projecteur et au gestionnaire d'ouvrages de mieux estimer le transport solide et de prédire les pertes en capacité des ouvrages.

Ce programme a été appliqué pour quantifier le transport solide en suspension à la station de Sidi Bel Attar située à l'exutoire du bassin versant de Chellif durant la période 1972-1996. L'estimation a été basée sur des débits liquides moyens journaliers et des débits de crues enregistrés durant la période en question. Les résultats obtenus ont montré que les apports solides en hiver sont les

plus abondants et réguliers. Ils attestent que le bassin versant de Chellif est d'une érodabilité élevée, avec une valeur minimale des apports solides trouvée de $8 \cdot 10^6$ t/an.

Désormais, l'importance et la nature de l'ouvrage seront prédéterminantes dans le choix de l'application de calcul afin de tenir compte des différences de résultats observées au cours de l'étude. Par ailleurs, la confrontation de ces résultats avec des mesures et des expérimentations de terrain nous permettra de faire le meilleur choix.

Cette méthodologie d'étude peut être utilisée comme un moyen simple et directement applicable pour l'estimation des apports solides sur d'autres bassins versants algériens.

□

► Tableau 6 – Valeurs des apports solides.

Période	1	2	3	4	5	6
Débit solide en suspension (kg/s)	1 205	996	1 077	395	876	217
Apport solide annuel (10^6 t/an)	38		19			17
Taux d'érosion (t/km ² .an)	870		445			394
1 = annuelle, 2 = automne, 3 = hiver, 4 = printemps, 5 = humide, 6 = sèche						

► Tableau 7 – Relations et coefficient de corrélation.

Période	Nature	Nombre de points	Coefficient A	Coefficient K	Intervalle de prédiction	Coefficient de corrélation	Relation
1	M	398	1,03	33,34	2,59	92 %	$33,24 \times Q^{1,03}$
	D	288	1,02	32,26	3,89	90 %	$32,26 \times Q^{1,02}$
2	M	248	1,4	16,51	4,06	90 %	$16,51 \times Q^{1,4}$
	D	139	1,26	29,05	3,41	92 %	$29,05 \times Q^{1,26}$
3	M	223	1,14	15,58	3,2	91 %	$15,58 \times Q^{1,14}$
	D	175	1,28	6,23	2,74	94 %	$6,23 \times Q^{1,28}$
4	M	177	1,18	12,37	2,90	95 %	$12,37 \times Q^{1,18}$
	D	116	1,5	1,27	3,78	93 %	$1,27 \times Q^{1,5}$
5	M	319	1,18	16,17	3,51	92 %	$16,17 \times Q^{1,18}$
	D	225	1,11	18,89	3,10	92 %	$18,89 \times Q^{1,11}$
6	M	183	1,19	12,27	3,29	94 %	$12,27 \times Q^{1,19}$
	D	125	1,97	7,59	6,17	87 %	$7,59 \times Q^{1,97}$
1 = annuelle, 2 = automne, 3 = hiver, 4 = printemps, 5 = humide, 6 = sèche							

Période	Nature	Débit solide en suspension (kg/s)	Apport solide annuel (10 ⁶ t/an)	Taux d'érosion (t/km ² .an)
1	M	1 253	38	863
	D	1 139		
2	M	1 002		
	D	997		
3	M	1 190	19	445
	D	942		
4	M	537		
	D	267		
5	M	959	17	390
	D	785		
6	M	283		
	D	136		

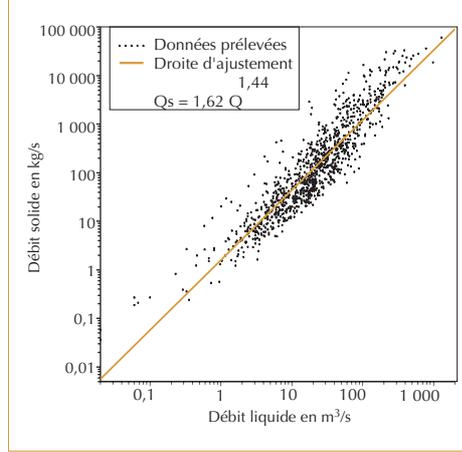


Tableau 8 – Apports solides dans le bassin versant de Chellif.

1 = annuelle,
2 = automne,
3 = hiver,
4 = printemps,
5 = humide,
6 = sèche

Figure 3 – Corrélation annuelle entre débit solide et débit liquide.

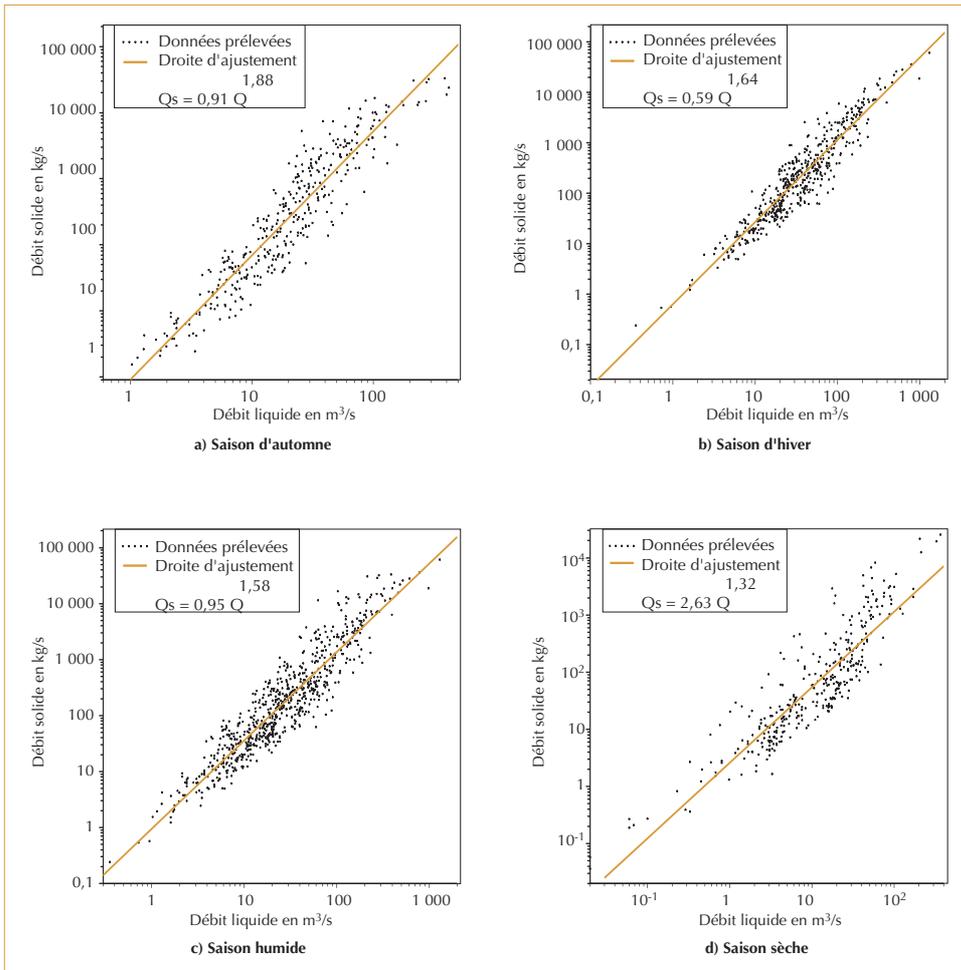


Figure 4 – Corrélation saisonnière entre débit solide et débit liquide.

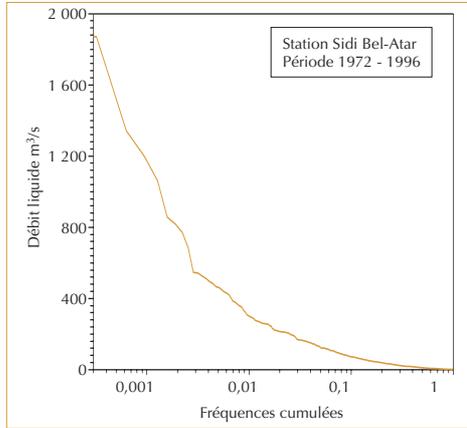


Figure 5 – Courbe des débits classés à l'échelle annuelle.

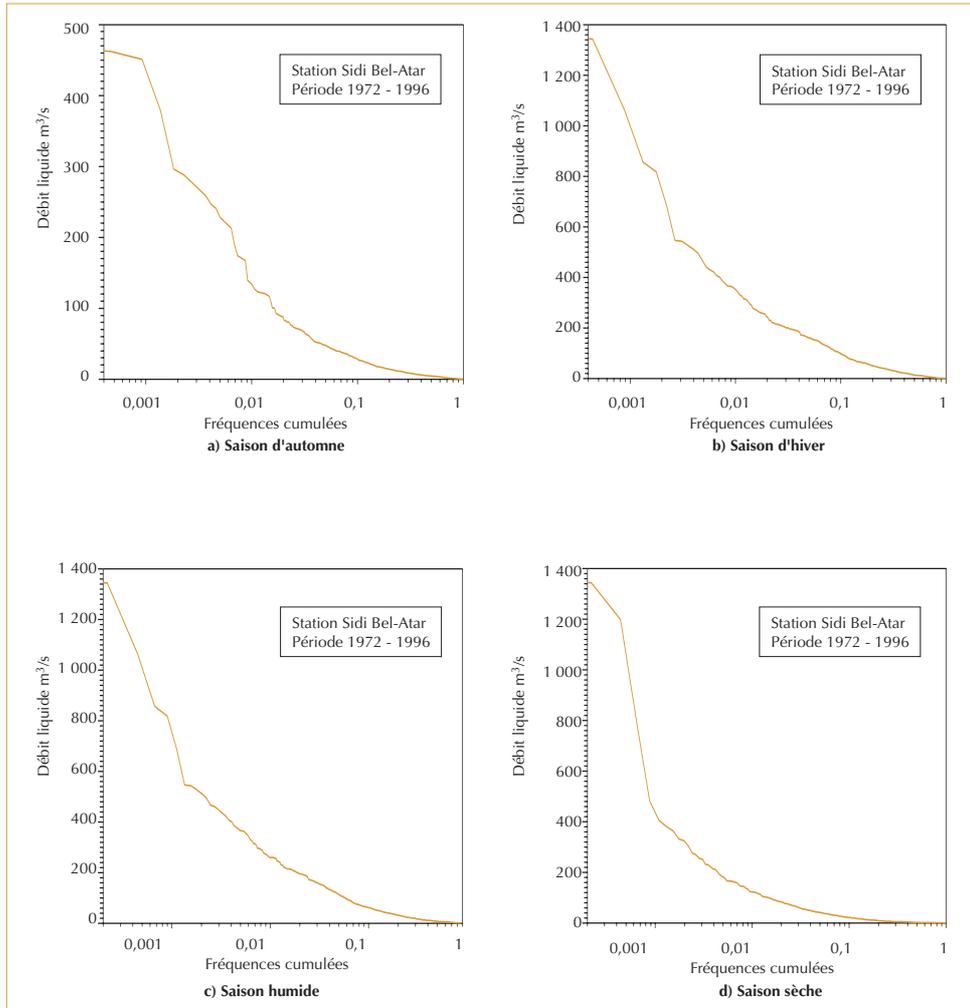
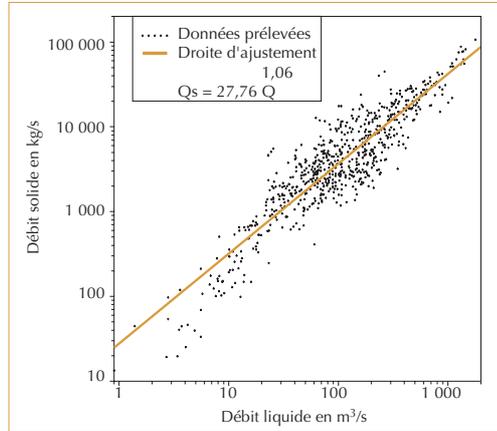
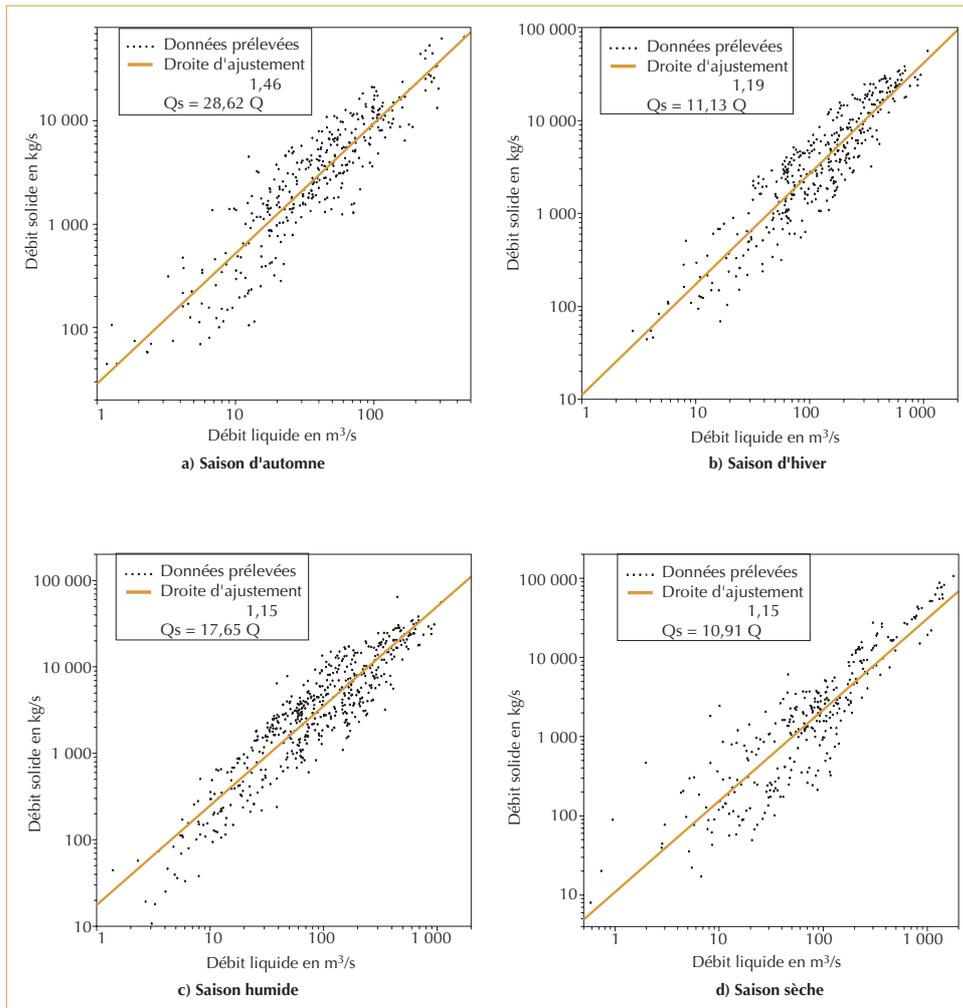


Figure 6 – Courbes des débits classés à l'échelle saisonnière.

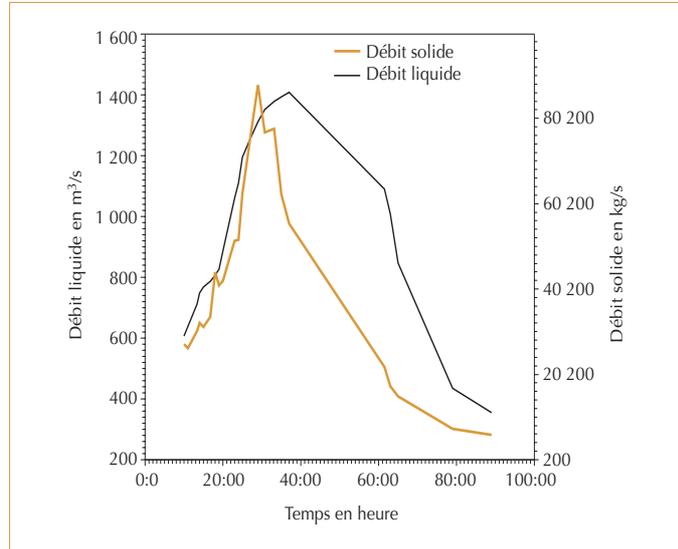
► Figure 7 – Corrélation annuelle entre débit solide et débit liquide (crues entières).



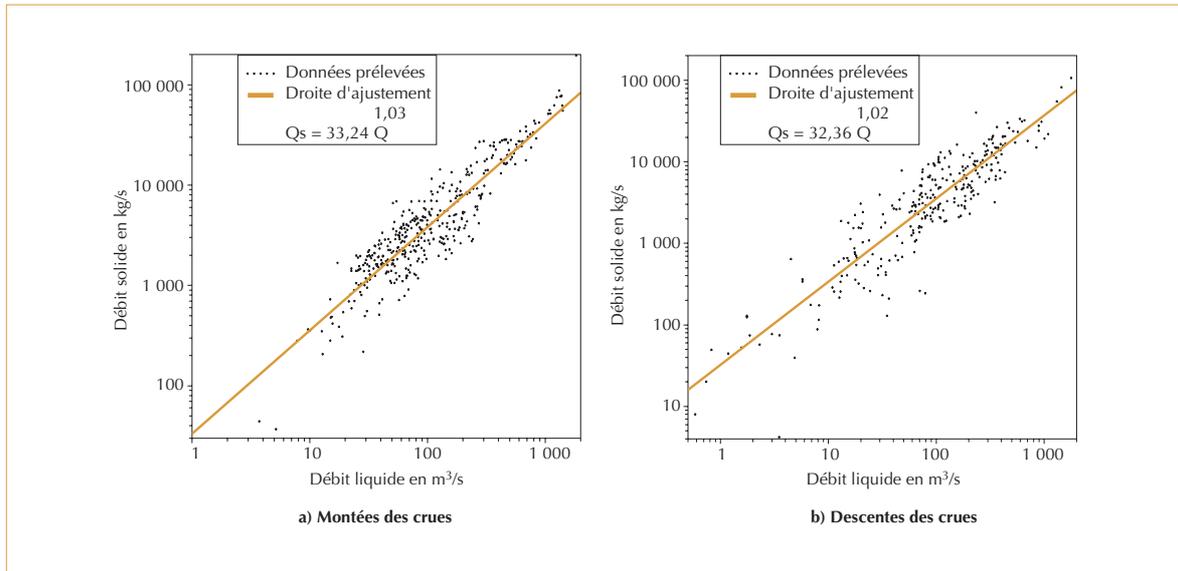
▼ Figure 8 – Corrélation saisonnière entre débit solide et débit liquide (crues entières).

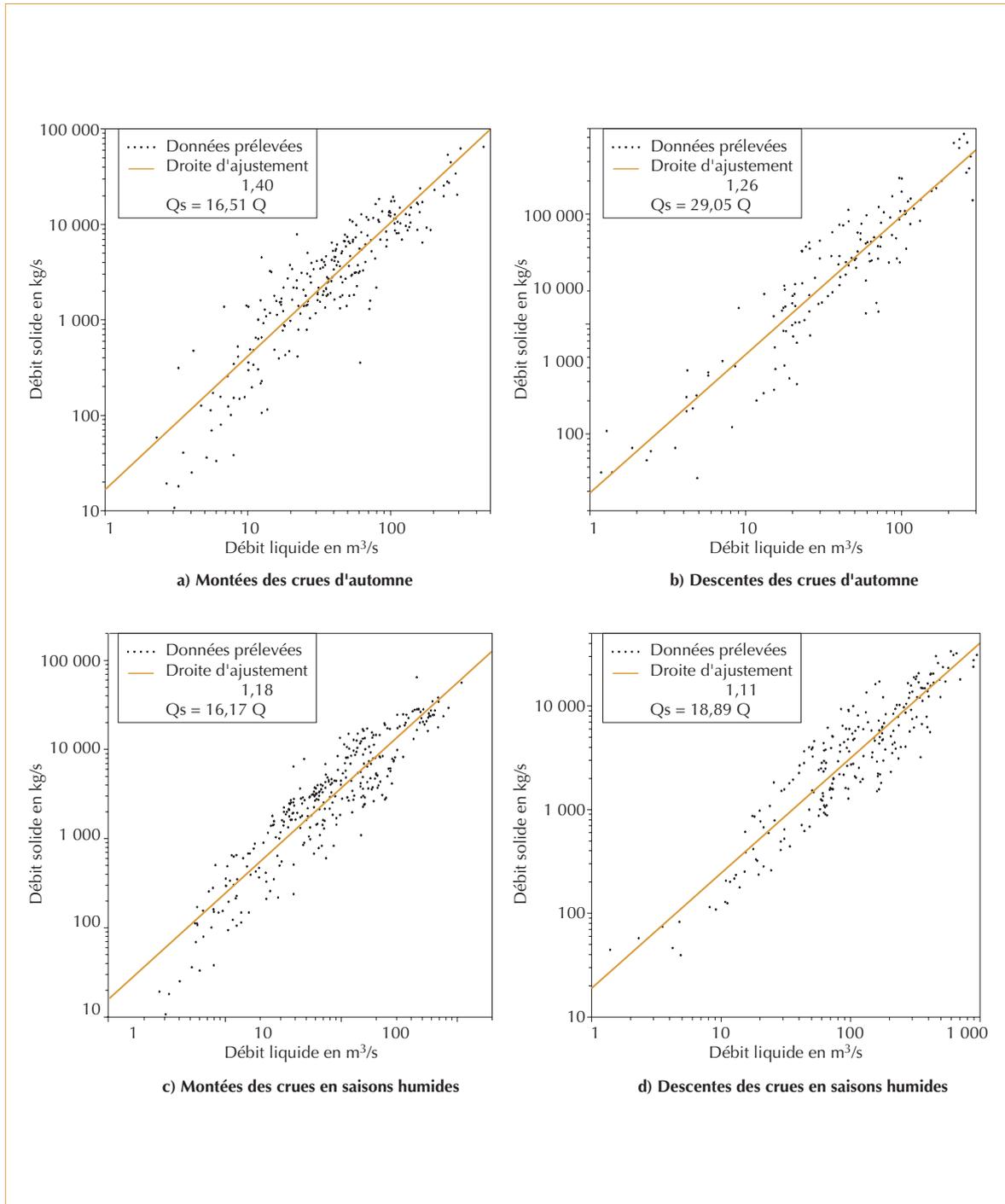


► Figure 9 – Hydrogramme et turbidigramme de la crue du 2 au 5/02/1979.



▼ Figure 10 – Corrélation annuelle entre débit solide et débit liquide (dissociation des crues).





▲ Figure 11 – Corrélation saisonnière entre débit solide et débit liquide (dissociation des crues).

Résumé

Le transport solide dans les cours d'eau en Algérie est très élevé. Cependant, il est mal quantifié dans certains oueds à cause de l'absence et du manque de données concernant surtout la concentration en particules fines et même l'indisponibilité des stations de jaugeage. Afin de combler ce vide, un programme basé sur des statistiques des échantillons recueillis a été mis au point. L'estimation des apports solides en suspension a été faite à partir des débits liquides moyens journaliers, du débit total d'une crue et de la dissociation de la crue (montée et descente). Les résultats obtenus par l'application de ce modèle sur la bassin versant du Chellif sont très encourageants, puisque les coefficients de corrélation des relations débit solide-débit liquide, annuelle et saisonnière varient de 87 % à 95 %. Le bassin versant de Chellif est d'une érodabilité très élevée ; la masse solide érodée est située entre 8 et 38 10⁶ tonnes/an.

Abstract

In order to permit a rapid response for the request of the engineers for the estimate of quantity of the solid transport to the exutory of a watershed, a simple and easy tool to make in work has been set up. The adopted principal based on hydrometric data of measuring stations. A seasonery and annual analysis have permitted to define an appropriate estimating method of solid bringing. The study has been bought by analysing delivered daily means, by integral floods and finely by decomposition of floods. SIDI BEL-ATAR station to the exutory of a watershed of CHELLIF has been selected as an application. The obtained results are satisfactory enough because of the fact of the correlating coefficients of the models $Q_s = f(Q)$ are between 87% and 95%. The quantity the founded suspended sediment are situated between 8 and 38 millions of tans per year, they appear huge without doubts due to the vulnerability of CHELLIF basin in a relation to its erosion and the importance of its oued CHELIFF bringing liquid and turbulent and its torrential regime.

Bibliographie

- BOUVARD, M., 1984, *Barrages mobiles et ouvrage de dérivation*, édition Eyrolles, Paris.
- BOWKER, A.-H., 1965, *Méthodes statistiques de l'ingénieur*, édition Dunod, Paris.
- CHOW, V.-T., 1988, *Applied hydrology*, Mc Graw Hill, édition, Singapore.
- DEMMAK, A., 1982, *Étude sur l'érosion et le transport solide*, thèse de doctorat ingénieur, univ. de Paris.
- REMINI, B., 1997, *Envasement des retenues de barrages en Algérie : importance, mécanismes et moyen de lutte par la technique du soutirage*, thèse de doctorat d'État, École nationale polytechnique.