

QUANTIFICATION DES FLUX DE MATIÈRES EN SUSPENSION DE TROIS FLEUVES CÔTIERS MÉDITERRANÉENS (BASSIN DE L'ÉTANG DE BERRE) : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Mirabelle FIANDINO ⁽¹⁾ et Claude MARTIN ⁽²⁾

(1) : 13 Rue des Jasses, 13 510 ÉGUILLES. Mél : mfiandin@club-internet.fr .

(2) : UMR 6012 "ESPACE" du CNRS, Département de Géographie, Université de Nice-Sophia-Antipolis, 98 Boulevard Édouard Herriot, BP 3209, 06204 NICE cedex 03.

RESUMÉ : Cet article compare différentes approches appliquées à la quantification des flux de MES des fleuves côtiers de l'Étang de Berre. Pour le calcul des flux correspondant aux campagnes de prélèvements d'eau, deux méthodes ont été utilisées : la première traite les données à pas de temps constant en suivant le rythme des prélèvements, la seconde à pas de temps variable en s'appuyant sur tous les points de l'hydrogramme utilisés pour l'évaluation des écoulements. Dans les deux cas, les concentrations des MES nécessaires aux calculs peuvent être reconstituées grâce aux régressions liant les concentrations aux débits pour chaque épisode hydrologique. Les flux journaliers ont ensuite été corrélés à un indice I_q , établi à partir des données hydrologiques, qui traduit l'agressivité érosive potentielle au cours de la journée considérée. Une autre approche, fondée sur les données pluviométriques, a été appliquée afin d'extrapoler les données mesurées sur une période plus longue. Elle reconstitue directement les flux mensuels et s'appuie sur un indice I_p représentant l'érosivité potentielle des pluies au cours du mois. L'approche utilisant les données hydrologiques est la plus satisfaisante, mais les deux approches fournissent des valeurs annuelles moyennes peu différentes.

MOTS-CLÉS : cours d'eau, flux de matières en suspension, prélèvements d'eau, quantification des exportations en suspension, extrapolation des données dans le temps, bassin versant de l'Étang de Berre.

ABSTRACT : This paper presents the various approaches applied to the quantification of fluxes of suspended matter from the coastal rivers of the Pond of Berre. For the calculation of suspended matter fluxes corresponding to the sampling campaigns of water, two methods were used. The first treats the data with step of constant time while following the rhythm of the sampling, the second with step of variable time while being based on all the points of the hydrograph used for the evaluation of the flows. In both cases, the concentrations of the suspended matter necessary to calculations can be reconstituted thanks to the relationships between the concentrations and the flows established for each hydrological event. Daily flows were then correlated with an index I_q , developed by using the hydrological data, which translates potential erosive aggressiveness during the day considered. Another approach, founded to the rainfall records, was applied in order to extrapolate, over a longer period, the measured data. It reconstitutes monthly fluxes directly and is based on an index I_p representing the potential erosivity of the rains during the month. The approach using the hydrological data is most satisfactory, but the two approaches provide average annual values not very different.

KEY-WORDS : rivers, fluxes of suspended matter, samplings of water, quantification of suspended matter outputs, extrapolation in the time of the measured values, drainage basin of the Pond of Berre.

I - INTRODUCTION

Les recherches portent sur les trois principaux fleuves qui se jettent dans l'Étang de Berre : l'Arc, la Touloubre et la Cadière (Fig. 1).

Le terrain d'étude est situé dans le Sud-Est de la France, autour d'Aix-en-Provence. Il connaît un climat de type méditerranéen (précipitations annuelles moyennes à Aix-Galice : 616 mm sur la période 1961-2000). Le relief est constitué de massifs calcaires associés à

des plaines dégagées dans des roches tendres (argiles, marnes et/ou molasse). Le point culminant atteint 1011 m, dans le massif de la Sainte-Victoire.

Les garrigues et les pinèdes couvrent de 42 à 50 % de la superficie de chacun des bassins versants. La part des surfaces vouées à l'agriculture s'établit à 43 et à 50 % sur les bassins de l'Arc et de la Touloubre. Elle tombe à 25 % sur celui de la Cadière qui est le plus urbanisé (25 % de la superficie totale ; contre 4,5 et 10 % sur les deux autres bassins).

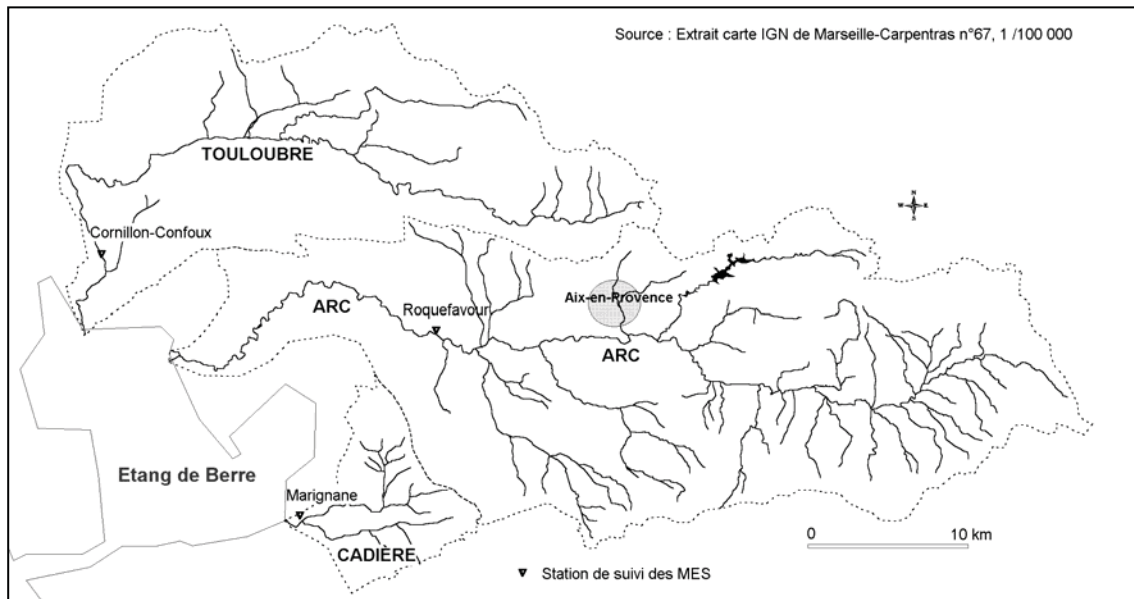


Figure 1 - Présentation des bassins versants.

Les investigations ont été menées dans le cadre de travaux destinés, non seulement à quantifier les apports de matières en suspension (MES) à l'Étang de Berre, mais aussi à définir les relations entre les flux de MES et les caractères des bassins versants.

Le présent article est consacré aux méthodes mises en œuvre pour mesurer les flux de MES, de septembre 1998 à décembre 2000, puis pour étendre sur une période plus longue les résultats obtenus, en s'appuyant sur les données hydrologiques et pluviométriques.

II - LE DISPOSITIF DE MESURE

La quantification des flux de MES nécessite de connaître à la fois les concentrations des matières en suspension et les volumes d'eau écoulés.

Les recherches se sont appuyées sur les stations hydrométriques gérées par la DIREN. L'objectif étant de quantifier les apports à l'Étang de Berre, nous avons choisi des stations proches de l'embouchure des fleuves :

- la station de Roquefavour sur l'Arc (superficie contrôlée : 650 km² ; soit 90 % du bassin total) ;
- la station de Cornillon-Confoux, au pont de la Glacière, sur la Touloubre (superficie contrôlée : 386 km², soit 96,5 % du bassin total) ;
- la station Marignane, au stade Saint-Pierre, pour la Cadière (superficie contrôlée : 72,4 km² ; soit 99 % du bassin total).

Afin de réaliser le plus grand nombre possible de prélèvements d'eau destinés à la mesure des concentrations de MES, un préleveur automatique d'échantillons a été installé au niveau ou à proximité immédiate de chaque station hydrométrique (Fig. 2). Les appareils utilisés sont équipés de 24 flacons d'une contenance d'un litre pour celui de la Cadière et d'un demi-litre pour ceux mis en place sur les autres stations.

Les prises d'eau des préleveurs n'ont pas été positionnées au fond du lit. Elles ont été fixées à 70 cm au-dessus dans le cas de l'Arc (attachée à une racine), à 20 cm dans le cas de la Touloubre (attachée à un piquet) et à 50 cm dans celui de la Cadière (attachée à la grille de protection de conduite d'eau de la station hydrométrique).

Afin de vérifier la représentativité des points de prélèvement automatiques, des prélèvements manuels ont été effectués, au niveau des stations de prélèvement, sur toute la largeur des cours d'eau et à différentes profondeurs. Pour l'Arc, par exemple, lors de la crue du 20 septembre 2000, à 11 heures, l'échantillon prélevé automatiquement présente une concentration des MES de 1,70 g/l, alors que les échantillons prélevés manuellement (au nombre de 12) ont des concentrations comprises entre 1,61 et 1,85 g/l (moyenne de 1,67 g/l). Sur le même cours d'eau, le 21 avril 1999 à 10 heures, en basses eaux, la concentration correspondant au prélèvement automatique est de 0,067 g/l, alors que les prélèvements manuels (6 échantillons) donnent des concentrations comprises entre 0,052 et 0,081 g/l (moyenne de 0,070 g/l).

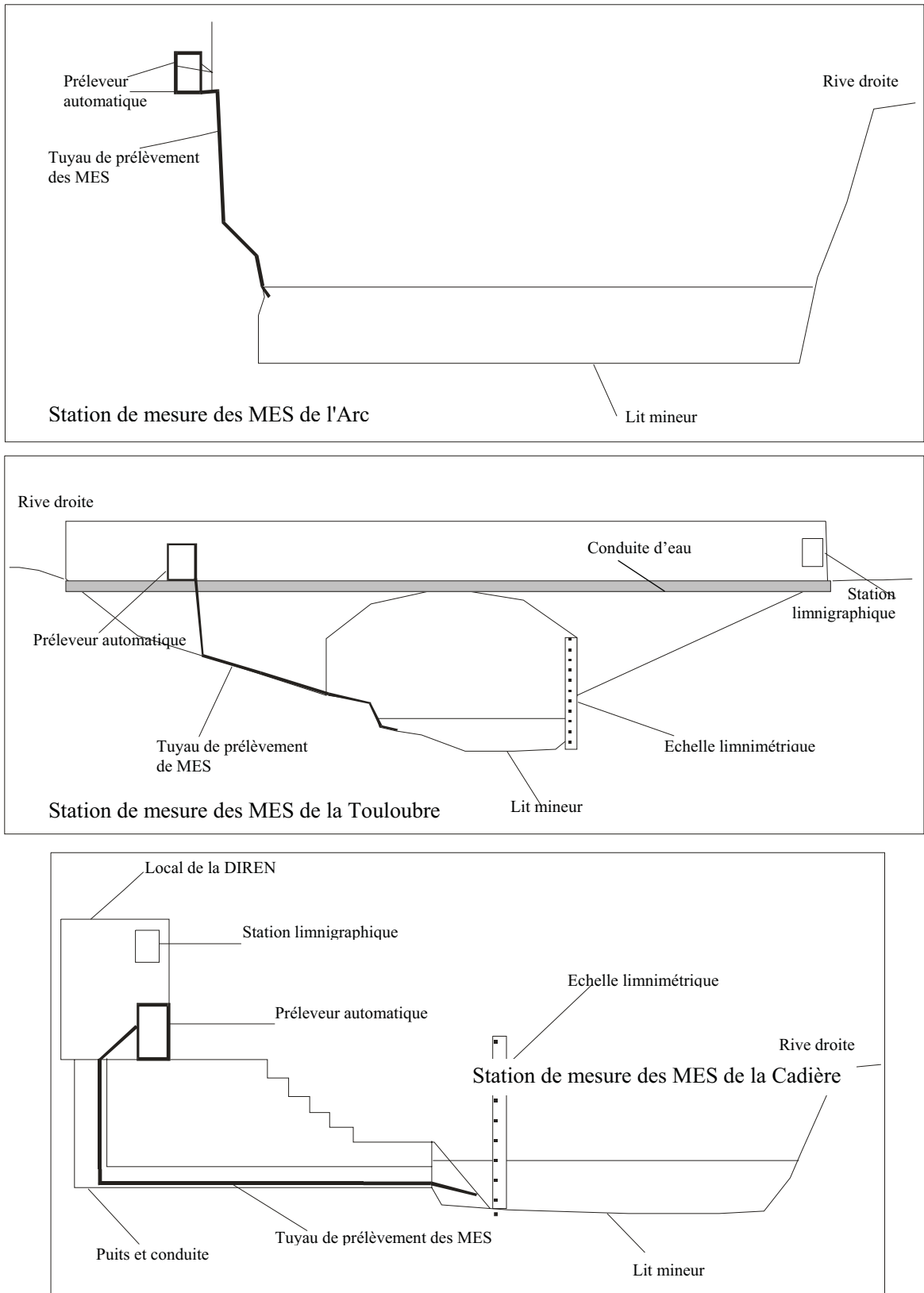


Figure 2 - Les stations de prélèvement des échantillons d'eau.

Pour les trois stations, on peut estimer que les échantillons collectés par les préleveurs automatiques fournissent une estimation de la

concentration moyenne des MES sur la section transversale du cours d'eau au moment du prélèvement avec un risque d'erreur de 5 %.

III - LES CAMPAGNES DE PRÉLÈVEMENTS

Les préleveurs automatiques ont été opérationnels en septembre 1998 sur la Touloubre et la Cadière, et en février 1999 sur l'Arc. Toutefois des prélèvements manuels ont été réalisés sur les trois cours d'eau à partir de septembre 1998.

Sur la période d'observation, du 1^{er} septembre 1998 au 31 décembre 2000, une centaine d'événements pluviométriques ont été observés, parmi lesquels une trentaine ont engendré des crues (Fig. 3 à 5). Sur l'Arc et la Touloubre, l'épisode hydrologique le plus violent s'est produit le 25 décembre 2000 (débits journaliers spécifiques de 114 et de 27 l/s/km² respectivement). Pour la Cadière, c'est un épisode orageux très localisé qui a provoqué la réponse hydrologique la plus forte : débit journalier spécifique de 188 l/s/km² le 7 septembre 1998 (précipitations journalières de 146 mm à Marignane, dont 77 mm en une heure). Il faut noter que les débits de base de la Touloubre sont plus élevés du printemps à l'automne qu'en hiver, ce qui s'explique par la fourniture d'eau en provenance de la Durance par les canaux d'irrigation.

Toutes les crues importantes ont fait l'objet d'un suivi attentif, ces épisodes étant partout responsables de la majeure partie des transports de MES (M. MEYBECK *et al.*, 1994). 26 campagnes ont été réalisées sur l'Arc, 18 sur la Touloubre et 20 sur la Cadière. En raison de la taille relativement petite de son bassin versant, les crues de la Cadière sont moins longues que celles des deux autres bassins et ce cours d'eau connaît des variations plus rapides des concentrations des MES. En conséquence, le préleveur automatique implanté sur la Cadière a été programmé au pas de temps d'une heure ou d'une heure et demie, alors que les préleveurs de l'Arc et de la Touloubre ont toujours fonctionné sur un pas de temps de deux heures.

Des campagnes de prélèvements ont en outre été effectués en basses eaux : 10 sur l'Arc, 16 sur la Touloubre et 11 sur la Cadière.

Pour chaque crue ou pour chaque campagne en basses eaux, 24 à 48 échantillons ont été prélevés. Face au nombre considérable d'échantillons récoltés, il a fallu se résoudre à n'en traiter qu'une partie. La sélection s'est attachée à conserver les échantillons les plus turbides et à disposer de valeurs variées pour

chaque campagne de prélèvements. Au total, plus de 2500 échantillons ont été analysés.

Les concentrations des MES ont été déterminées au Laboratoire de Géographie Physique de l'Université de Provence, par pesée des matières en suspension après décantation dans un flacon, vidange presque totale de l'eau et séchage du culot à 40 °C. La matière organique a été mesurée sur 160 échantillons, en procédant à une calcination à 500 °C des matières en suspension.

IV - LES RELATIONS ENTRE LES CONCENTRATIONS DES MES ET LES DÉBITS INSTANTANÉS

En pointe de crue, les concentrations mesurées varient de 0,1 à 4 g/l pour l'Arc (avec des débits instantanés allant de 4 à 110 m³/s), de 0,05 à 2,15 g/l pour la Touloubre (avec des débits instantanés de 4 à 15 m³/s), et de 0,1 à 3,5 g/l pour la Cadière (avec des débits instantanés de 2 à 55 m³/s). Les matières en suspension renferment de 5 à 15 % de produits organiques dans le cas de l'Arc, de 7 à 15 % dans celui de la Touloubre et de 15 à 30 % dans celui de la Cadière.

Pour les basses eaux, les concentrations des MES sont comprises entre 0,01 et 0,04 g/l sur l'Arc ; 0,04 et 0,08 g/l sur la Touloubre ; 0,03 et 0,06 g/l sur la Cadière. Une partie plus ou moins importante de la charge solide provient alors soit des rejets des stations d'épuration et des rejets domestiques directs, soit des particules entraînées par les eaux d'irrigation. La part de la matière organique dans les MES varie de 10 à 29 % pour l'Arc, avoisine généralement 6 % pour la Touloubre et atteint 46 % en moyenne pour la Cadière dont le bassin est le plus densément peuplé (densité de population de 1400 habitants/km², contre 350 pour l'Arc et 250 pour la Touloubre).

Pour chaque cours d'eau, et pour l'ensemble de la période d'observation, les concentrations des MES ne sont pas liées étroitement aux débits (Fig. 6 à 8). Même en travaillant en coordonnées bi-logarithmiques (D.E. WALLING, 1971), les régressions apparaissent de qualité moyenne.

En revanche, on sait qu'en travaillant crue par crue, les relations deviennent fortes, surtout lorsque les bassins versants sont de petite taille (J. CORBONNOIS, 1991, 1998 ; C. MARTIN *et al.*, 1996 ; J.P. BRAVARD et F. PETIT, 1997).

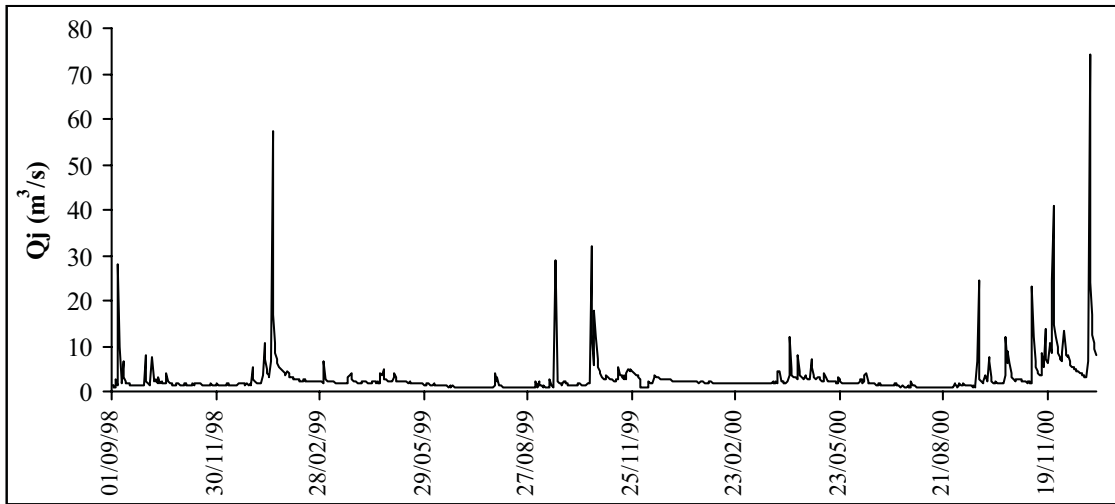


Figure 3 - Débits journaliers de l'Arc du 1^{er} septembre 1998 au 31 décembre 2000.

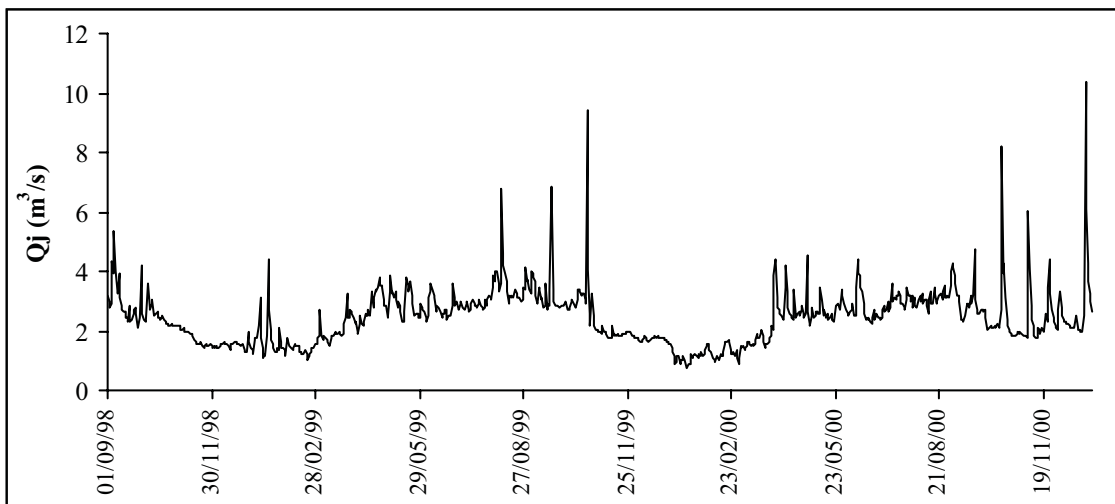


Figure 4 - Débits journaliers de la Touloubre du 1^{er} septembre 1998 au 31 décembre 2000.

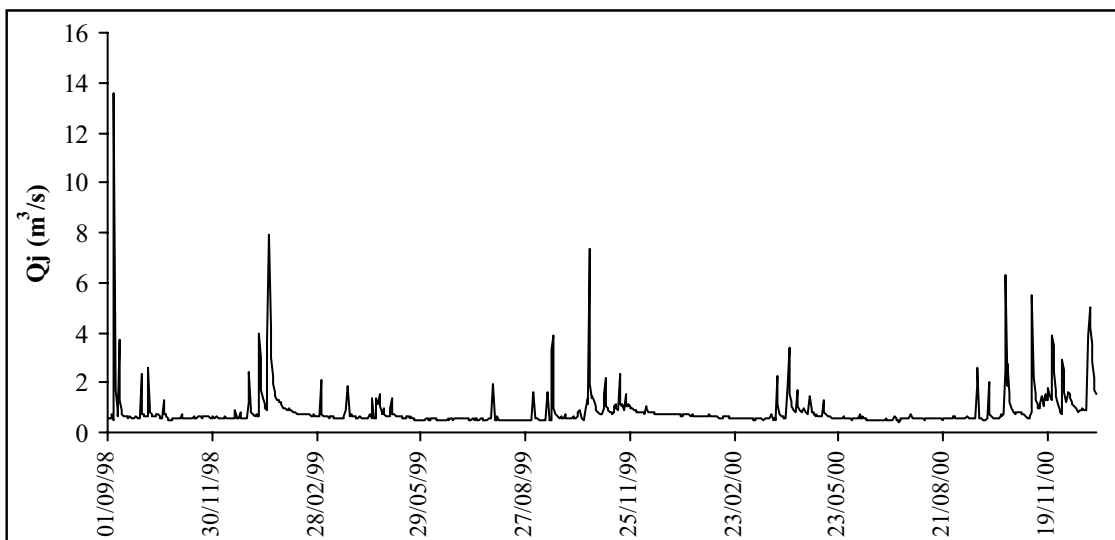


Figure 5 - Débits journaliers de la Cadière du 1^{er} septembre 1998 au 31 décembre 2000.

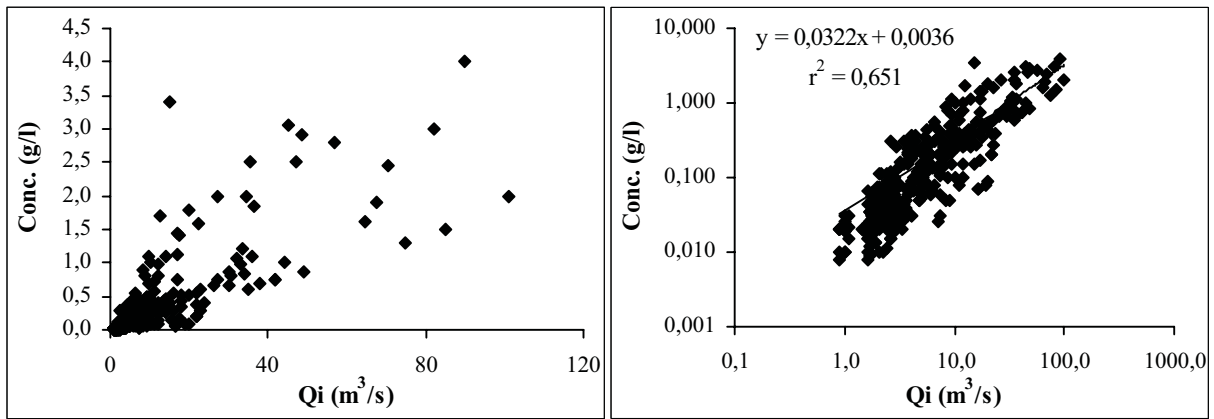


Figure 6 - Relations (linéaire et bi-logarithmique) entre les concentrations des MES (Conc.) et les débits instantanés (Q_i) de l'Arc.

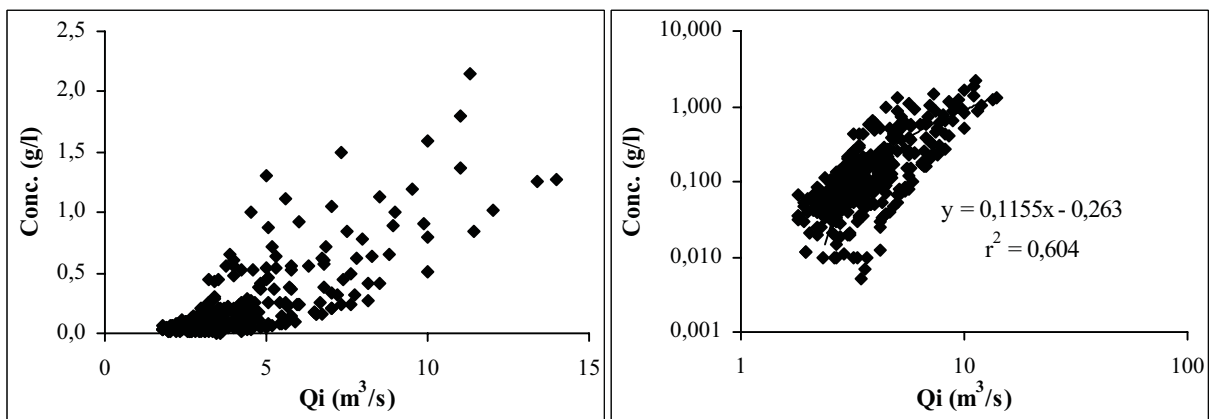


Figure 7 - Relations (linéaire et bi-logarithmique) entre les concentrations des MES (Conc.) et les débits instantanés (Q_i) de la Touloubre.

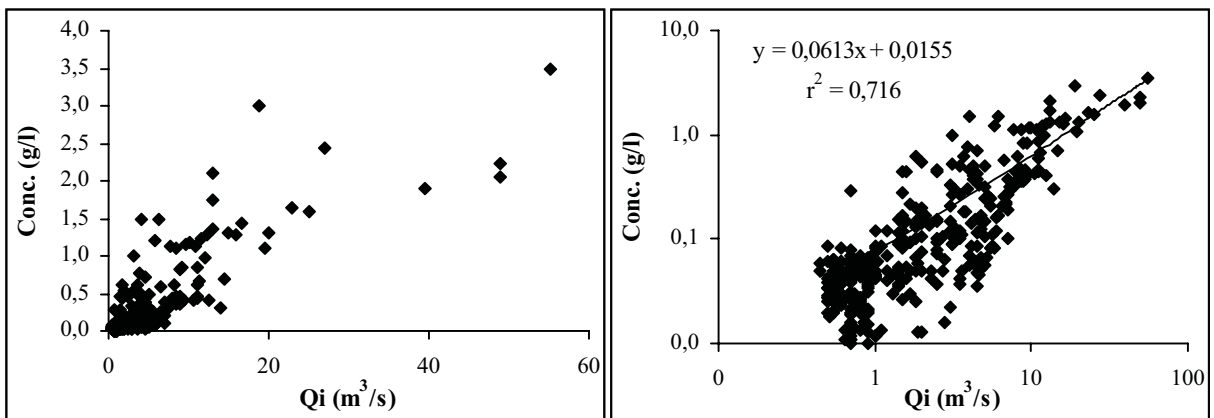


Figure 8 - Relations entre les concentrations des MES (Conc.) et les débits instantanés (Q_i) de la Cadière.

Du fait des caractères des bassins versants (taille, roches, formations superficielles, occupation des sols), les crues de l'Arc, de la Touloubre et de la Cadière sont relativement étalées dans le temps. Il n'est donc pas apparu nécessaire de traiter séparément les montées de crue et les décrues comme dans le cas de bassins

au fonctionnement impulsionnel (C. MARTIN *et al.*, 1996).

Pour chaque épisode hydrologique considéré, nous avons étudié les relations entre les concentrations mesurées et les débits

instantanés, en recherchant la meilleure solution parmi les possibilités suivantes :

- linéaire de la forme $y = ax + b$,
- polynomiale de la forme $y = ax^2 + bx + c$,
- logarithmique de la forme $y = a \ln x$,
- puissance de la forme $y = a x^b$,
- ou exponentielle de la forme $y = a e^{bx}$.

Les figures 9 à 11 fournissent des exemples de relations entre les concentrations et les débits en crue. Les coefficients de corrélation sont forts, aussi bien pour les crues très violentes (Fig. 9 et 11), qui s'accompagnent de concentrations élevées, que pour des crues plus modestes (Fig. 10), au cours desquelles les concentrations restent faibles.

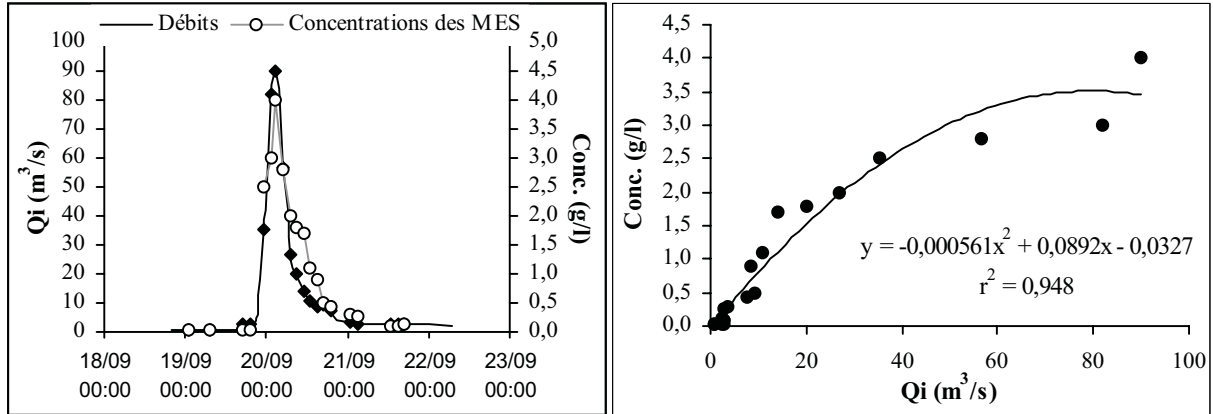


Figure 9 - Relation entre les concentrations (Conc.) et les débits instantanés (Qi) lors de la crue de l'Arc du 19 au 21 septembre 2000.

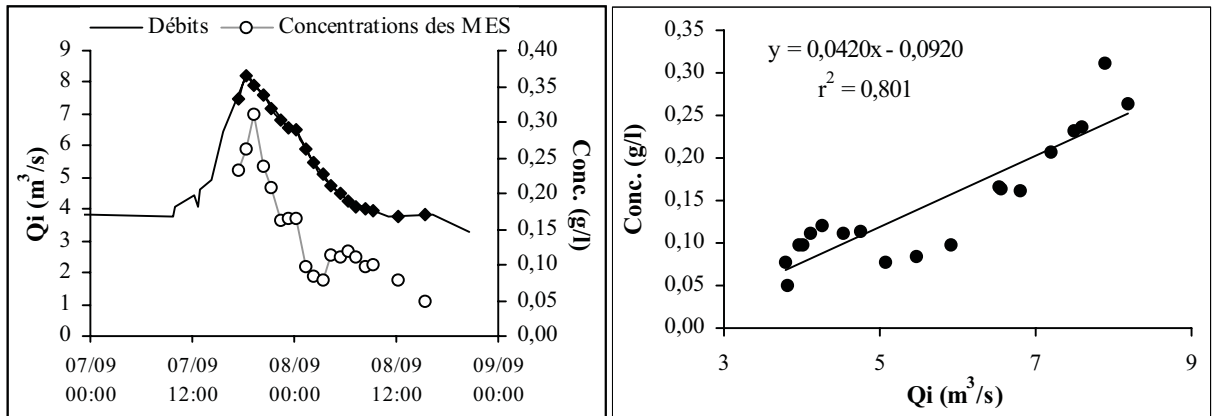


Figure 10 - Relation entre les concentrations (Conc.) et les débits instantanés (Qi) lors de la crue de la Touloubre du 7 au 8 septembre 1998.

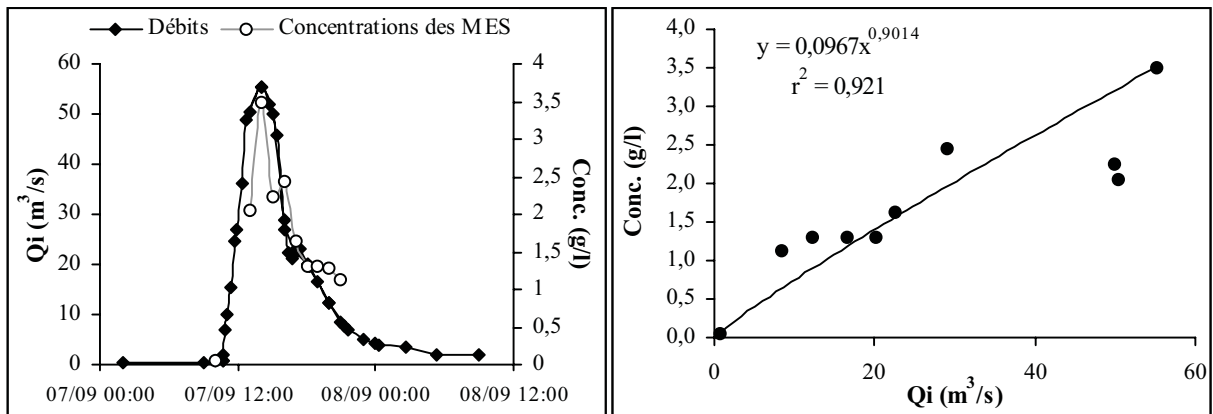


Figure 11 - Relation entre les concentrations (Conc.) et les débits instantanés (Qi) lors de la crue de la Cadière du 7 au 8 septembre 1998.

Pour chaque campagne de prélèvements en basses eaux, nous avons également recherché les meilleures équations liant les concentrations des MES aux débits. Du fait de la modestie des concentrations et de l'influence des apports parasites, les régressions sont souvent d'assez mauvaise qualité. Dans certains cas, les concentrations ont en outre été liées négativement aux débits.

V - CALCUL DES FLUX DE MES PENDANT LA PÉRIODE D'OBSERVATION

Les exportations de matières en suspension ont été calculées pour chaque campagne de prélèvements.

1) Le calcul des flux lors des crues

Deux méthodes de calcul ont été comparées : une méthode à pas de temps constant et une méthode à pas de temps variable.

La première méthode (M. MEYBECK *et al.*, 1994) nécessite de connaître les concentrations des MES selon un pas de temps constant, donné par le rythme des prélèvements d'eau (soit une heure, une heure et demie ou deux heures dans le cadre de nos recherches). Pour chaque prélèvement, le flux instantané est obtenu en multipliant la concentration instantanée (C_i) mesurée [ou reconstituée grâce à l'équation de régression retenue pour l'épisode étudié (voir chapitre IV)] par le débit instantané correspondant (Q_i). Pour quantifier les flux (F_i) à l'échelle de la crue, on procède comme si la concentration et le débit ne subissaient aucune variation sur une durée égale à l'intervalle de temps adopté, ou plus exactement à la somme des deux demi-intervalles précédant et suivant le prélèvement considéré :

$$\text{Flux (tonnes)} = \sum (C_i \times Q_i \times \Delta T) / 1000$$

où C_i est la concentration instantanée des MES (en g/l), Q_i le débit instantané (en m^3/s) et ΔT , l'intervalle de temps (en secondes) entre deux prélèvements.

La deuxième méthode, inspirée des travaux de l'un d'entre nous (C. MARTIN, 1987 ; C. MARTIN *et al.*, 1996), prend en compte tous les points de l'hydrogramme utilisés pour évaluer les écoulements. Pour chacun de ces points, la concentration des MES est calculée à l'aide de l'équation de régression liant les concentrations aux débits pour l'épisode considéré. Les flux

instantanés sont obtenus en multipliant les valeurs correspondantes du débit et de la concentration des MES. Entre deux points de l'hydrogramme, les calculs sont menés comme si les régressions étaient rectilinéaires ; du fait de la proximité des points, l'erreur ainsi introduite apparaît négligeable.

Les flux de MES calculés suivant les deux méthodes sont très proches pour les trois cours d'eau (Fig. 12). C'est la méthode à pas de temps variable, *a priori* la plus rigoureuse, qui a été utilisée pour la suite des investigations.

2) Le calcul des flux en basses eaux

Les relations entre les concentrations et les débits n'étant pas très fortes en basses eaux, les flux journaliers de MES ont été estimés à partir des concentrations mesurées (2 à 12 mesures par campagnes) et des débits moyens journaliers. À l'échelle de la journée, la quantité de matières en suspension évacuée est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Flux (tonnes)} = C_m \times Q_m \times 86400$$

où C_m est la moyenne des concentrations mesurées dans la journée, Q_m le débit moyen journalier et 86400 la durée du jour en secondes.

VI - L'EXTENSION DANS LE TEMPS DES RÉSULTATS DES MESURES

Pour chaque cours d'eau, les valeurs mesurées des flux sédimentaires ont été corrélées aux données hydrologiques (débits instantanés et journaliers) et pluviométriques (précipitations journalières, intensité horaire des pluies). Il n'a pas été possible d'utiliser conjointement les données hydrologiques et pluviométriques. En effet, il existe un temps de retard entre les précipitations et les réponses hydrologiques. De plus, les pluies journalières sont mesurées de 7 h à 7 h (en heures d'hiver) par Météo France, alors que les débits journaliers sont établis par la DIREN de 0 à 24 h.

1) Relations entre les flux de MES et les conditions hydrologiques

Divers essais ont porté sur l'utilisation des données instantanées. Pour ce faire, nous avons cherché à améliorer les relations entre les concentrations de MES et les débits établies pour l'ensemble des crues de la période d'observation. Afin de ne considérer que des eaux susceptibles d'avoir provoqué une érosion sur les versants,

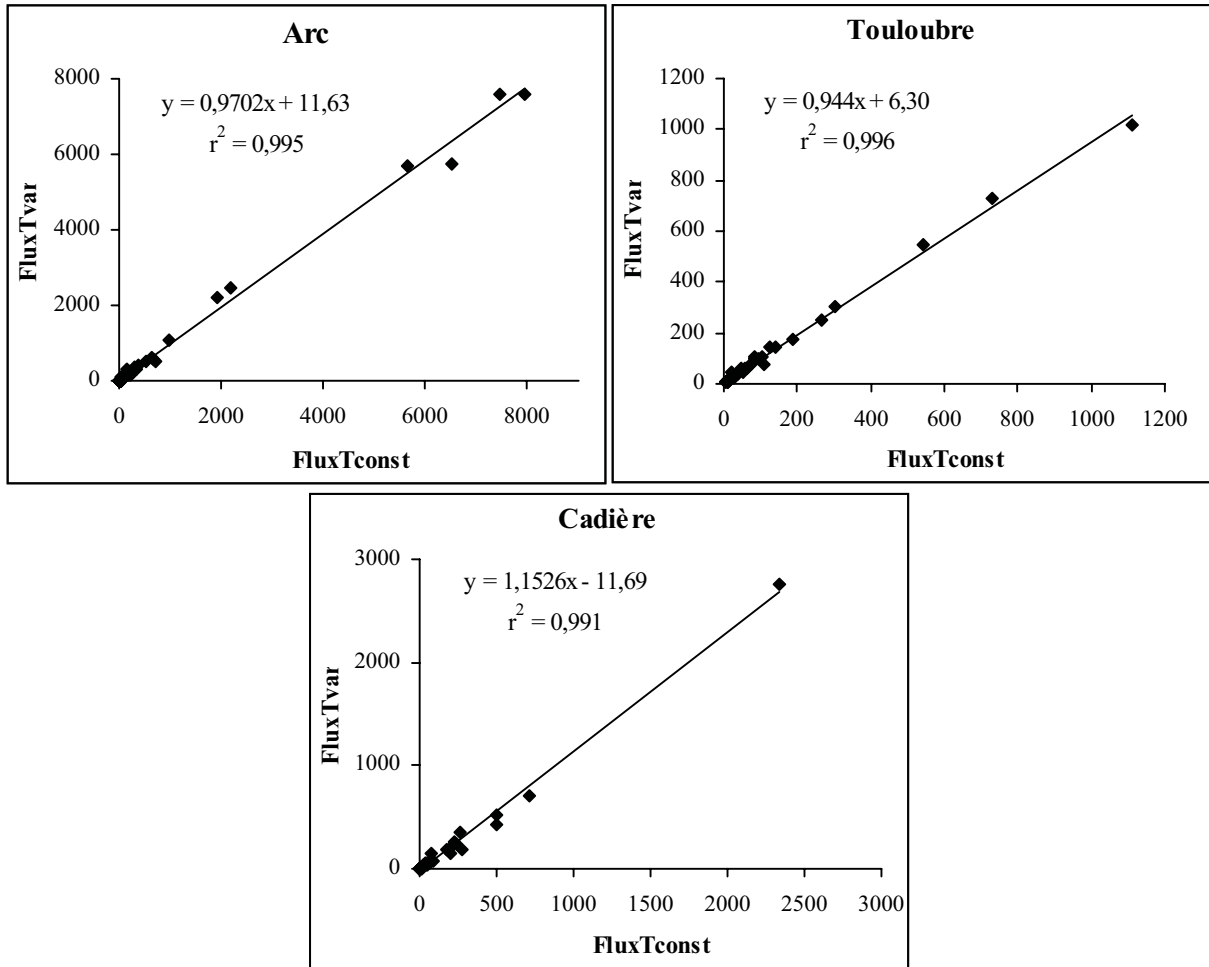


Figure 12 - Relations entre les flux de MES (tonnes) calculés avec les méthodes à pas de temps variable (FluxTvar) et à pas de temps constant (FluxTconst) pour les campagnes de prélèvements en crue.

nous avons pris en compte des écoulements diminués des débits de base. Nous avons aussi essayé d'introduire comme paramètres la localisation des précipitations sur les bassins versants, leur répartition saisonnière et leur intensité maximum au cours des épisodes considérés. Mais toutes ces approches se sont révélées décevantes.

Après ces premiers essais infructueux, nous avons abordé le problème de la reconstitution des flux de MES en travaillant sur les flux journaliers en crue mesurés lors des campagnes de prélèvements. De nombreuses combinaisons des variables explicatives (débits journaliers, débits instantanés maximum et minimum) ont été testées pour chaque cours d'eau, sous forme de régressions simples, doubles ou multiples, grâce au logiciel Hydrolab (J.P. LABORDE et N. MOUHOUS, 1998). Les meilleures équations obtenues mettent en jeu les débits journaliers et les débits maximums instantanés. Toutefois, même si les coefficients de corrélation étaient élevés, les équations ne donnaient pas de résultats

satisfaisants lorsqu'elles étaient appliquées aux données hydrologiques antérieures (flux sédimentaires calculés fortement négatifs ou, au contraire, atteignant des valeurs très élevées, incompatibles avec ce que l'on sait des fonctionnements hydrosédimentaires des bassins versants).

Une autre approche empirique a donc été développée. Elle s'appuie sur les valeurs journalières des flux de MES établies à partir des données recueillies lors des campagnes de prélèvements.

Pour les crues, un indice (I_q) est calculé pour traduire l'influence des phénomènes érosifs. Il peut prendre deux formes :

$$I_q = a Q_j + b Q_{imax}$$

$$\text{ou } I_q = (a Q_j + b Q_{imax}) \times (DQ/Q_{imax})$$

où Q_j est le débit journalier (en m^3/s), Q_{imax} le débit maximum instantané (en m^3/s), DQ la différence entre les débits instantanés maximum et

minimum (en m^3/s) et où $a + b = 1$. Les constantes a et b sont définies par tâtonnements successifs, jusqu'à obtenir la meilleure régression possible entre les valeurs journalières des flux sédimentaires et de l'indice Iq . La forme de Iq est choisie pour donner les meilleurs résultats.

Pour les basses eaux, les flux journaliers de MES sont corrélés aux débits journaliers.

Le tableau I présente les équations obtenues pour les trois cours d'eau. Dans tous les cas, les régressions entre les flux sédimentaires mesurés

et les paramètres hydrologiques sont assez bonnes. Les figures 13 à 15 montre la qualité des ajustements.

2) Relations entre les flux de MES et les conditions pluviométriques

Sur la période d'observation (1998-2000), toutes les régressions cherchant à lier les flux journaliers de MES aux précipitations journalières et aux intensités horaires maximales se sont révélées médiocres, les coefficients de corrélation étant compris entre 0,3 et 0,5.

Tableau I - Lois générales de fonctionnement hydrosédimentaire des cours d'eau d'après les conditions hydrologiques.

| Fleuve | Crues | Faibles écoulements |
|-----------|---|---|
| Arc | $Fj = 0,79560 Iq^2 + 123,09729 Iq - 733,10436$ $r = 0,95$ et $r^2 = 0,91$, avec $Iq = (0,8 Qj + 0,2 Qimax) \times (DQ/Qimax)$ | $Fj = 9,5315 Qj - 9,0776$ $r = 0,82$ et $r^2 = 0,68$ |
| Touloubre | $Fj = 1,2249 Iq^3 - 10,574 Iq^2 + 56,074 Iq - 81,957$ $r = 0,95$ et $r^2 = 0,90$, avec $Iq = 0,7 Qj + 0,3 Qimax$ | $Fj = 8,2907 Qj - 8,5894$ $r = 0,77$ et $r^2 = 0,60$ |
| Cadière | $Fj = 0,1795 Iq^3 - 3,1021 Iq^2 + 46,7 Iq - 45,313$ $r = 0,98$ et $r^2 = 0,97$, avec $Iq = (0,65 Qj + 0,35 Qimax) \times (DQ/Qimax)$ | $Fj = 3,9371 Qj$ $r = 0,91$ et $r^2 = 0,82$ |

Fj : flux journalier de MES (tonnes). Iq : indice traduisant l'agressivité érosive journalière potentielle. Qj : débit journalier (m^3/s). $Qimax$: débit instantané maximum le jour considéré (m^3/s). DQ : différence entre les débits instantanés maximum et minimum (m^3/s). r : coefficient de corrélation. r^2 : coefficient de détermination.

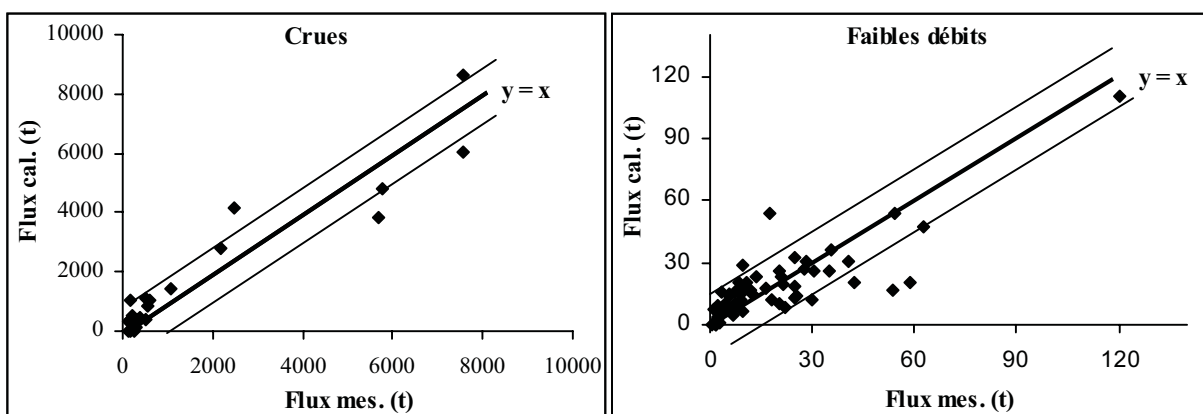


Figure 13 - Arc : comparaison entre les flux journaliers de MES (tonnes) calculés à partir des données hydrologiques (Flux cal.) et les flux mesurés (Flux mes.), avec un intervalle de confiance de 80 %.

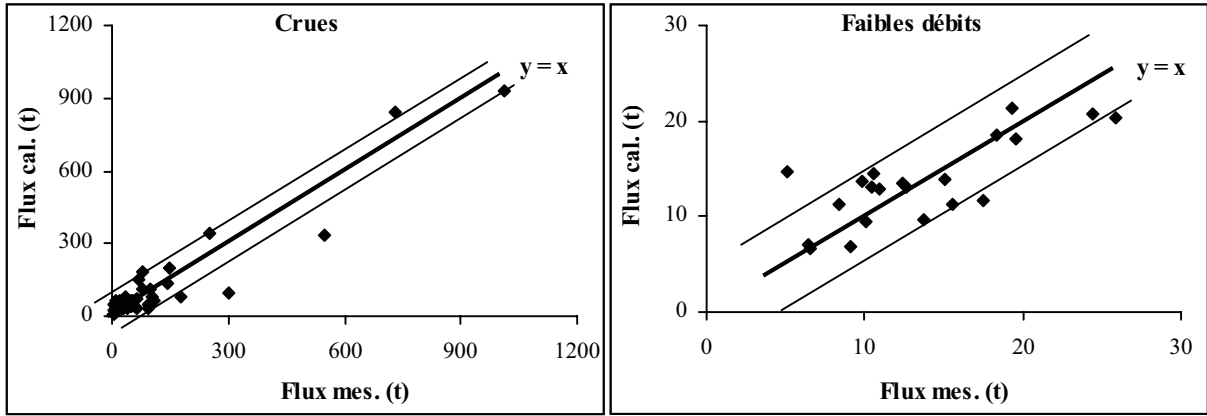


Figure 14 - Touloubre : comparaison entre les flux journaliers de MES (tonnes) calculés à partir des données hydrologiques (Flux cal.) et les flux mesurés (Flux mes.), avec un intervalle de confiance de 80 %.

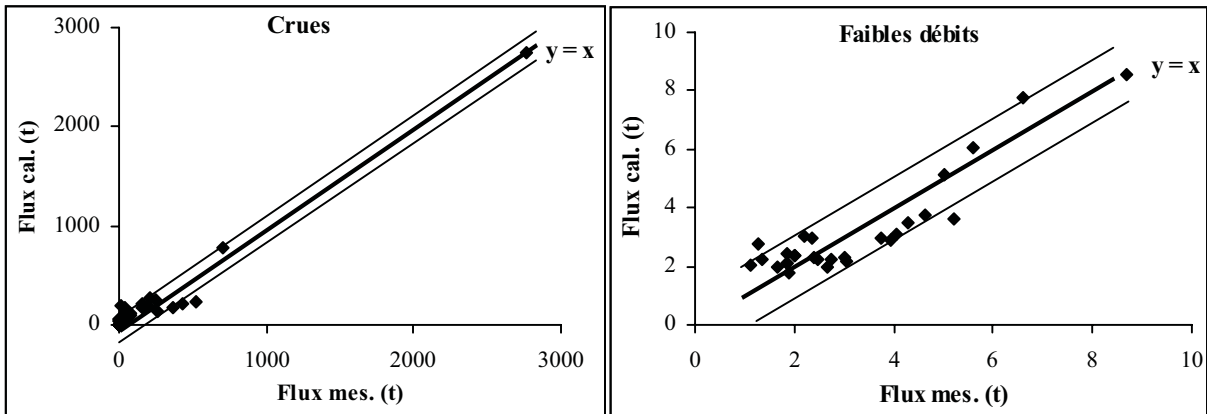


Figure 15 - Cadière : comparaison entre les flux journaliers de MES (tonnes) calculés à partir des données hydrologiques (Flux cal.) et les flux mesurés (Flux mes.), avec un intervalle de confiance de 80 %.

Le choix s'est finalement porté sur une approche permettant de reconstituer directement les flux mensuels (C. MARTIN *et al.*, 2000). Les valeurs mensuelles des exportations de suspensions sur la période d'observation ont été déterminées à partir des valeurs mesurées lors des campagnes de prélèvements et des valeurs journalières estimées à l'aide des régressions entre les flux et les débits pour les périodes sans prélèvements (essentiellement pour les basses eaux). Les flux mensuels de MES ainsi déterminés sont corrélés aux pluies journalières maximales des mois correspondants, à travers deux indices (I_p et I_p') représentant l'agressivité potentielle des pluies au cours du mois :

$$I_p = a P_{mjs} + b P_{nj}$$

$$I_p' = (a P_{mjs} + b P_{nj}) \times c I_{ihs}$$

où P_{mjs} et P_{nj} sont les pluies maximales (en

mm) en m jours successifs et n jours non successifs au cours du mois, I_{ihs} les précipitations maximales (en mm) des pluies en i heures successives au cours du même mois, et où $a + b = 1$. Les constantes a , b et c , ainsi que la valeur de i , sont déterminées par tâtonnements successifs.

Pour les bassins de l'Arc et de la Touloubre, les équations ont été établies en utilisant différents jeux de stations météorologiques. Lorsque plusieurs stations sont prises en compte, les valeurs retenues pour les précipitations sont les valeurs moyennes. Les équations sont présentées dans les tableaux II à IV.

De ces tableaux, il ressort que les relations ne sont pas très fortes pour l'Arc et pour la Touloubre. Elles sont beaucoup plus étroites dans

Tableau II - Lois générales de fonctionnement hydrosédimentaire de l'Arc d'après les conditions pluviométriques.

| Stations météorologiques | Équation | r | r ² |
|---|---|------|----------------|
| <u>6 stations</u> (La Fare, Aix Les Milles, Aix Galice, Trets, Vauvenargues, Mimet) | 1) $F_m = 75,755 I_p$ $I_p = ((0,6 P_{2js}) + (0,4 P_{4j})) ((\sqrt{I_{2hs}}) / 5)$ | 0,81 | 0,66 |
| <u>6 stations</u> (La Fare, Aix Les Milles, Aix Galice, Trets, Vauvenargues, Mimet) | 2) $F_m = 0,794 I_p^2 + 0,95 I_p$ $I_p = (0,6 P_{2js}) + (0,4 P_{4j})$ | 0,87 | 0,76 |
| <u>2 stations</u> (Aix Galice, Rousset) | 3) $F_m = 0,211 I_p^2 + 39,751 I_p$ $I_p = (0,4 P_{2js}) + (0,6 P_{4j})$ | 0,76 | 0,58 |
| <u>1 station</u> (Aix Galice) | 4) $F_m = 72,817 I_p$ $I_p = ((0,2 P_{2js}) + (0,8 P_{4j})) ((\sqrt{I_{2hc}}) / 5)$ | 0,76 | 0,58 |
| <u>1 station</u> (Aix Galice) | 5) $F_m = 0,413 I_p^2 + 19,78 I_p$ $I_p = (0,2 P_{2js}) + (0,8 P_{4j})$ | 0,80 | 0,64 |

F_m : flux mensuel de MES (tonnes). I_p et I_p' : indices traduisant l'érosivité potentielle des pluies au cours du mois. P_{2js} : précipitations maximales en deux jours successifs au cours du mois (mm). P_{4j} : précipitations maximales en quatre jours non consécutifs au cours du mois (mm). I_{2hs} : précipitations maximales en deux heures successives au cours du mois (mm). r : coefficient de corrélation. r^2 : coefficient de détermination.

Tableau III - Lois générales de fonctionnement hydrosédimentaire de la Touloubre d'après les conditions pluviométriques.

| Stations météorologiques | Équation | r | r ² |
|--|--|------|----------------|
| <u>3 stations</u> (Lambesc, Salon, Saint Cannat) | 1) $F_m = 12,341 I_p + 299,7$ $I_p = P_{2jc} ((\sqrt{I_{2hs}}) / 5)$ | 0,71 | 0,50 |
| <u>3 stations</u> (Lambesc, Salon, Saint Cannat) | 2) $F_m = 12,697 I_p + 228,9$ $I_p = (0,4 P_{2js}) + (0,6 P_{4j})$ | 0,68 | 0,46 |
| <u>1 station</u> (Salon) | 3) $F_m = 7,59 I_p + 367,4$ $I_p = P_{2jc} ((\sqrt{I_{2hs}}) / 5)$ | 0,63 | 0,40 |
| <u>1 station</u> (Salon) | 4) $F_m = 10,284 P_{2js} + 284,7$ | 0,64 | 0,41 |

Légende : voir tableau II.

Tableau IV - Lois générales de fonctionnement hydrosédimentaire de la Cadière d'après les conditions pluviométriques.

| Station météorologique | Équation | r | r ² |
|------------------------|---|------|----------------|
| Marignane | 1*) $F_m = 0,016 I_p^2 + 4,575 I_p + 115,6$ $I_p = (0,6 P_{2js} + 0,4 P_{4j}) ((\sqrt{I_{2hs}}) / 5)$ | 0,95 | 0,9 |
| Marignane | 2**) $F_m = 5,67 I_p + 111,8$ $I_p = (0,6 P_{2js} + 0,4 P_{4j}) ((\sqrt{I_{2hs}}) / 5)$ | 0,66 | 0,44 |
| Marignane | 3*) $F_m = 0,0013 I_p^3 - 0,1658 I_p^2 + 12,667 I_p$ $I_p = (0,6 P_{2js} + 0,4 P_{4j})$ | 0,96 | 0,92 |
| Marignane | 4**) $F_m = 6,9964 I_p + 33,5$ $I_p = (0,6 P_{2js} + 0,4 P_{4j})$ | 0,73 | 0,54 |

Légende : voir tableau II. * : équation intégrant le mois de septembre 1998 au cours duquel s'est produit un événement pluviométrique de fréquence centennale et hydrologique de fréquence décennale. ** : équation n'intégrant pas le mois de septembre 1998.

le cas de la Cadière, mais seulement si l'on prend en compte le mois de septembre 1998 au cours duquel le bassin de la Cadière a connu un événement d'ampleur exceptionnelle. La figure 16 compare les relations entre les flux mesurés

sur la Cadière et les flux calculés avec les équations 3 et 4 : sans le mois de septembre 1998, la pente de la droite de régression se trouve fortement diminuée.

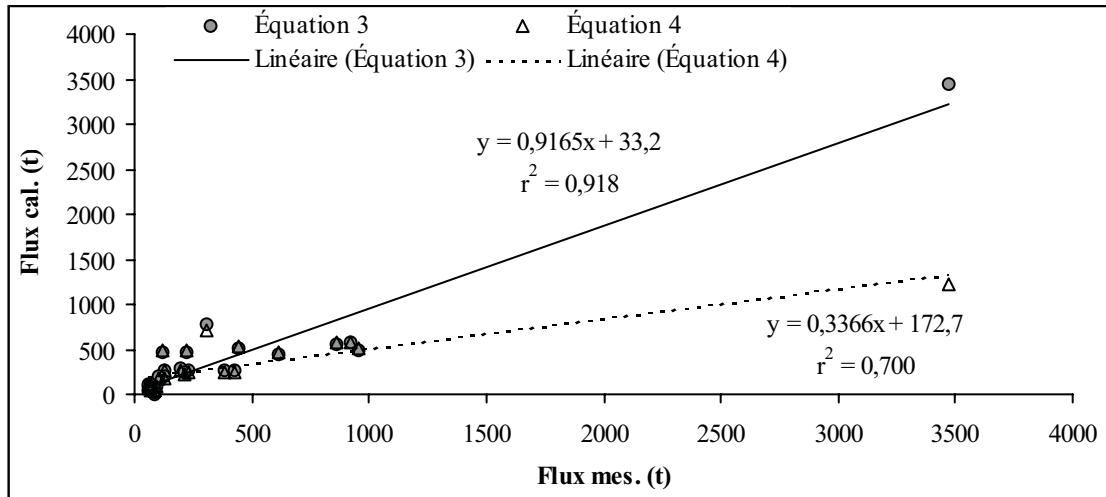


Figure 16 - Régressions entre les flux mensuels de MES (tonnes) mesurés sur la Cadière (Flux mes.) et ceux calculés (Flux cal.) avec les équations 3 (toute la période de mesure) et 4 (sans septembre 1998) fondées sur les données pluviométriques.

On remarque également que les équations intégrant les intensités horaires (données qui ne sont pas toujours disponibles, en particulier pour les chroniques anciennes) ne sont pas forcément les plus satisfaisantes.

Enfin, les régressions établies en s'appuyant sur une seule station météorologique se révèlent d'une qualité presque équivalente à celle des régressions faisant intervenir plusieurs stations. Cela est particulièrement intéressant en ce qui concerne la Touloubre, la station de Salon étant la seule qui ait fonctionné sur une longue période.

Les équations retenues pour l'extension dans le temps des résultats des mesures des flux de MES sont : l'équation 5 pour l'Arc, l'équation 4 pour la Touloubre et l'équation 3 pour la Cadière (voir tableaux II à IV). Les ajustements correspondant à ces équations sont représentés, avec un intervalle de confiance de 80 %, sur la figure 17.

3) Comparaison des résultats obtenus par les deux approches

Les reconstitutions effectuées à partir des données hydrologiques se sont révélées les plus

satisfaisantes. Elles bénéficient de deux avantages :

- d'une part, elles s'appuient sur des valeurs journalières, ce qui permet de prendre en compte chaque épisode de manière séparée ;
- d'autre part, les données hydrologiques traduisent la réponse des écoulements aux précipitations, réponse qui, pour des volumes d'eau précipités identiques, peut différer en fonction de nombreux paramètres (état hydrique des sols ; répartition des pluies dans le temps ; intensité des pluies ; répartition spatiale des pluies ; état de surface des sols et taux de couverture par le couvert végétal, en particulier dans les zones cultivées).

Malheureusement, si les chroniques pluviométriques couvrent de longues périodes, les stations hydrométriques utilisées pour cette étude sont récentes. Les données hydrologiques utilisables débutent en juillet 1996 pour l'Arc et en août 1997 pour la Touloubre. Seule la station de Marignane sur la Cadière est relativement ancienne, puisqu'elle fonctionne depuis janvier 1984.

Il est donc nécessaire de tester la fiabilité des reconstitutions fondées sur les données

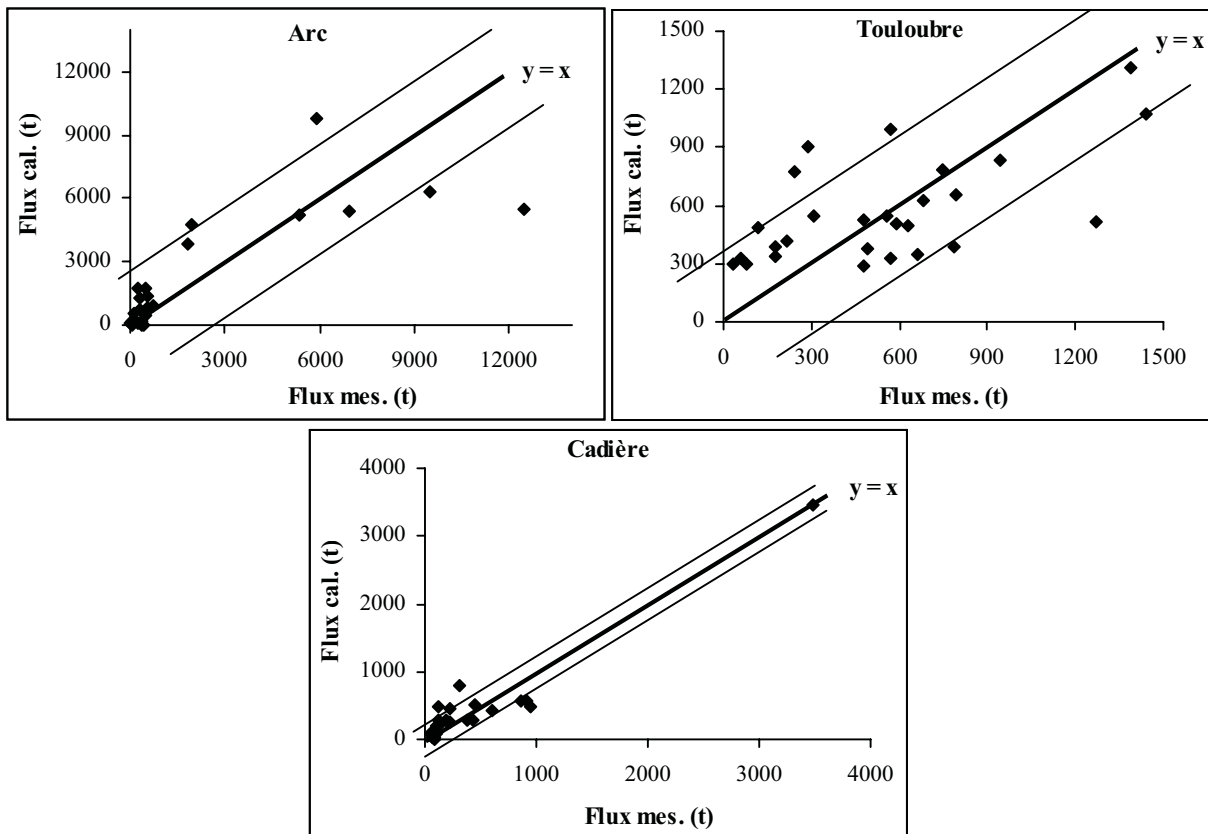


Figure 17 - Comparaison entre les flux mensuels de MES (tonnes) calculés à partir des données pluviométriques (Flux cal.) et les flux mesurés (Flux mes.), avec un intervalle de confiance de 80 %.

pluviométriques en les comparant à celles appuyées sur les données hydrologiques (Tab. V). Les résultats obtenus par les deux méthodes se révèlent très proches. Certes, les périodes considérées pour l'Arc et la Touloubre

correspondent pratiquement à celles des mesures des transports de MES qui ont servi à établir les équations. Mais la comparaison réalisée pour la Cadière, sur la période 1984-2000, confirme la convergence des deux méthodes.

Tableau V - Comparaison entre les flux annuels de MES calculés à l'aide des équations établies à partir des données hydrologiques et pluviométriques.

| Fleuve | Période | FluxQ (tonnes) | FluxQ spéc. (t/km ² /an) | FluxP (tonnes) | FluxP spéc. (t/km ² /an) | ÉcartP/Q % |
|-----------|-----------|----------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|------------|
| Arc | 1997-2000 | 97338 | 37,44 | 91723 | 35,28 | - 5,8 |
| Touloubre | 1998-2000 | 19462 | 16,8 | 20185 | 17,4 | + 3,7 |
| Cadière | 1984-2000 | 58619 | 47,6 | 54699 | 44,4 | - 6,7 |

FluxQ : flux annuels déterminés avec l'équation fondée sur les données hydrologiques (tonnes). FluxP : flux annuels déterminés avec l'équation fondée sur les données pluviométriques (tonnes). FluxQ spéc. et FluxP spéc. : flux annuels moyens spécifiques (t/km²/an). ÉcartP/Q : écart entre FluxP et FluxQ, exprimé en % de la valeur de FluxQ.

Si les valeurs annuelles moyennes fournies par les deux méthodes sont voisines, il en va souvent différemment des valeurs mensuelles (Fig. 18).

Par rapport aux équations fondées sur les

données hydrologiques, celles établies à partir des données pluviométriques surestiment les exportations mensuelles relativement modestes et sous-estiment les fortes exportations. Cette tendance se retrouve à l'échelle annuelle (Fig. 19).

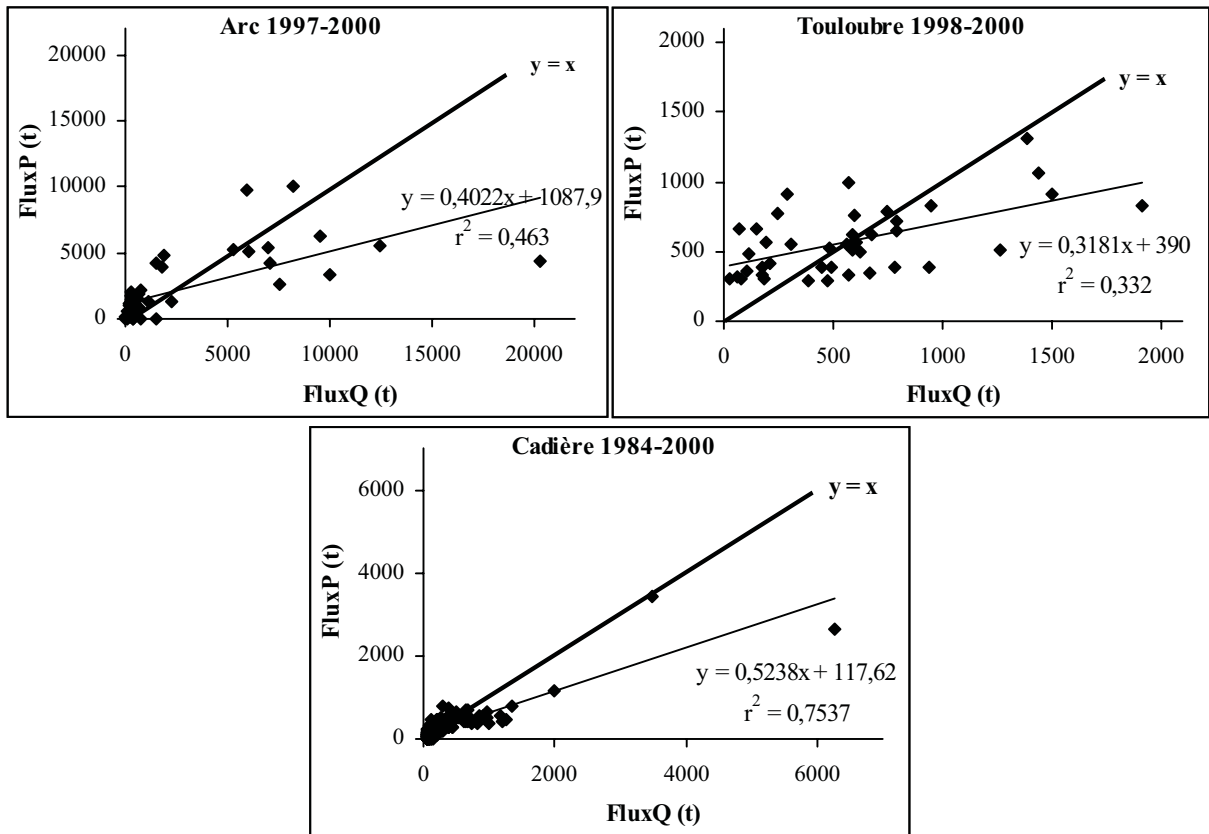


Figure 18 - Comparaison entre les flux mensuels de MES (tonnes) calculés à l'aide des équations établies à partir des données pluviométriques (FluxP) et hydrologiques (FluxQ).

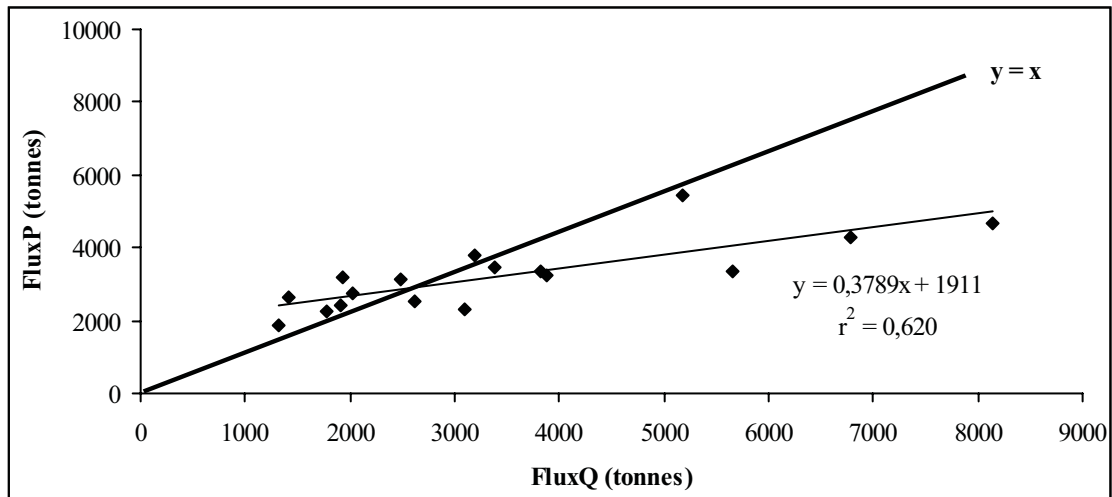


Figure 19 - Comparaison entre les flux annuels de MES de la Cadière (tonnes) calculés à partir des données hydrologiques (FluxQ) et pluviométriques (FluxP).

VII - CONCLUSION

La quantification des flux de MES à partir des hydrogrammes et des mesures des concentrations des suspensions dans les eaux, ne pose pas de difficulté particulière. Il suffit de disposer d'un nombre suffisant d'analyses,

couvrant en particulier toutes les crues importantes, mais aussi les écoulements de basses eaux lorsque ceux-ci transportent également des matières en suspension. Les cours d'eau étudiés autour de l'Étang de Berre n'ayant pas des réponses hydrologiques très brutales, le calcul des flux mené à pas de temps constant donne des résultats presque équivalents à ceux de l'approche à pas de temps variable.

Faute de disposer de mesures des flux de MES sur de longues périodes, il est nécessaire de procéder à l'extension dans le temps des résultats disponibles, afin d'avoir une idée de l'ampleur des phénomènes en relation avec l'irrégularité interannuelle des conditions pluviométriques. Le type de démarche adopté, à caractère empirique, met en relation les flux mesurés de MES avec des indices traduisant l'agressivité érosive potentielle de la période considérée. Les données hydrologiques permettent la reconstitution des flux journaliers de MES. Les données pluviométriques ne peuvent être utilisées que pour reconstituer les flux mensuels, mais elles portent généralement sur des périodes plus longues que celles ayant donné lieu à des suivis hydrologiques.

Les reconstitutions des flux annuels de MES sont plus fiables avec les données hydrologiques qu'avec les données pluviométriques. À cet égard, il faut noter que pour l'Arc et la Touloubre, sur lesquelles les stations hydro-métriques ont été déplacées juste avant le début de nos observations, il serait possible d'exploiter les données hydrologiques recueillies sur les anciennes stations, en tenant compte des différences entre les superficies contrôlées. L'utilisation des données pluviométriques conduit, le plus souvent, à sous-estimer les flux mensuels très élevés et à surestimer les flux moins abondants. Au total, les deux méthodes fournissent des valeurs annuelles moyennes assez proches. C'est en tout cas ce qui se passe pour la Cadière sur la période 1984-2000.

Remerciements : Les recherches ont bénéficié d'une bourse CIFRE. Nous remercions l'ANRT, la Société Safege-Cetiis (M. LEUCHER), l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Électricité de France (MM. PENNETIER et ROUX), le Syndicat d'Aménagement du bassin de l'Arc (M. HOLYST), le Syndicat Mixte d'Études de la Touloubre (M. RHODET), le Syndicat Intercommunal pour l'Aménagement du Ruisseau de la Cadière (M^{me} GURTLE et M. METSU), le Conseil Général des Bouches-du-Rhône, le Conseil Régional, la Direction Régionale de l'Environnement (MM. BLANC, GACHELIN, MILLO et BIANCONI), les Services Maritimes des Bouches-du-Rhône (M^{me} BERTRANDI), le GIP pour la réhabilitation de l'Étang de Berre (MM. PICON et BOUCET) et la Mission pour la Reconquête de l'Étang de Berre (M. GARCIA).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRAVARD J.P. et PETIT F. (1997) - *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*. Édit. A. COLIN, 222 p.
- CORBONNOIS J. (1991) - Crues et transports solides dans le ruisseau de Vezon (Lorraine). *Mosella*, vol. XVIII, p. 181-188.
- CORBONNOIS J. (1998) - Les facteurs de la variation spatio-temporelle des transports solides et dissous. *Géomorphologie*, n° 4, p. 313-329.
- FIANDINO M. (2003). - *Apports de matières en suspension par les fleuves côtiers à l'Étang de Berre (Bouches-du-Rhône, France) : quantification des flux, identification des zones sources, étude des relations avec les conditions hydrologiques*. Thèse de l'Université de Provence, 325 p. (supplément au n° XXXI, 2004, des *Études de Géographie Physique*, 260 p.).
- LABORDE J.P. et MOUHOUS N. (1998) - *Notice d'utilisation du logiciel Hydrolab*. Édit. Laboratoire d'Analyse Spatiale (UMR 6012 "ESPACE" du CNRS), Université de Nice-Sophia-Antipolis, 54 p.
- MARTIN C. (1987) - Les mesures de l'érosion chimique dans les bassins versants de roches cristallines : comparaison des résultats obtenus par différentes méthodes d'investigation dans le massif des Maures (Var - France). *Zeit. für Geomorph.*, N.F., vol. 31, n° 1, p. 73-84.
- MARTIN C, avec la collaboration de BÉGUIN É., LEVANT M. et QUILLARD J. (1996) - L'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle et d'un petit bassin versant après incendie de forêt dans le massif des Maures. *Étude et Gestion des Sols*, vol. 3, n° 3, p. 179-192.
- MARTIN C., DECOME A. et ALLÉE Ph. (2000) - Essai d'évaluation des risques d'érosion hydrique après incendie de forêt dans la partie occidentale du massif des Maures (Var, France). *Bull. Réseau Érosion*, n° 20 (Influence de l'homme sur l'érosion, n° 2, bassins versants, élevage, milieux urbain et rural), p. 440-451.
- WALLING D.E. (1971) - Sediment dynamics of small instrumented catchments in South-East Devon. *Transactions of the Devonshire Association*, vol. 103, p. 147-165.