

Les flux de matières en suspension de trois fleuves côtiers vers l'étang de Berre (Bouches-du-Rhône)

In: Méditerranée, Tome 102, 1-2-2004. Geosystèmes montagnards et méditerranéens. Un mélange offert à Maurice Jorda. pp. 171-180.

Citer ce document / Cite this document :

Fiandino Mirabelle. Les flux de matières en suspension de trois fleuves côtiers vers l'étang de Berre (Bouches-du-Rhône). In: Méditerranée, Tome 102, 1-2-2004. Geosystèmes montagnards et méditerranéens. Un mélange offert à Maurice Jorda. pp. 171-180.

doi : 10.3406/medit.2004.3353

http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/medit_0025-8296_2004_num_102_1_3353

Résumé

Les trois principaux cours d'eau se jetant dans l'étang de Berre ont été soumis à des campagnes de prélèvements d'eau, en crue et en basses eaux, de septembre 1998 à décembre 2000. Ce suivi hydrosédimentaire a permis la quantification des flux de matières en suspension à partir des concentrations mesurées sur les échantillons d'eau. La méthode de calcul retenue pour la période des mesures met en œuvre une approche à pas de temps variable qui utilise tous les points de l'hydrogramme ayant servi à l'évaluation des écoulements. Afin d'étendre les calculs de flux dans le temps, les flux journaliers ont ensuite été corrélés à un indice Iq, établi à partir des données hydrologiques, qui traduit l'agressivité érosive potentielle au cours de la journée considérée. Une seconde approche, fondée sur les données pluviométriques (indice Ip), a été appliquée afin d'extrapoler les données mensuelles sur une période plus longue. Ainsi sur la période 1961-2000, les flux de MES évalués à partir des données pluviométriques atteignent 35,5 t/km²/an pour l'Arc, 17,4 t/km²/an pour la Touloubre et 47,7 t/km²/an pour la Cadière. Les quantités annuelles moyennes de MES apportées à l'étang de Berre par les cours d'eau avoisinent 40000 tonnes.

Abstract

The three main streams flowing into the Étang de Berre have undergone water sampling at both high and low water periods from September 1998 to December 2000. This monitoring has permitted the quantification of flows of suspended materials from concentrations measured from the water samples. The measurements put into effect a step by step approach which used all points of the hydrogram in evaluating flow. In order to extend flow measurements over time, the daily flows were later correlated to an Iq index established from hydrological data, which translates the potential erosive power in the course of the day under consideration. A second approach, based on rainfall data (Ip index) was applied in order to extrapolate monthly data over a longer period. Thus, in the 1961-2000 period, flows of suspended materials evaluated from rainfall data reach 35.5 t/km²/yr for the Arc; 17.4t/km²/yr for the Touloubre; and 47.7t/km² for the Cadière. Average annual amounts of suspended materials flowing into the Étang de Berre from the these streams borders on 40 000 tons.

Les flux de matières en suspension de trois fleuves côtiers vers l'étang de Berre (Bouches-du-Rhône)

Flows of suspended materials of three coastal rivers into the Étang de Berre (Bouches-du-Rhône)

Mirabelle FIANDINO*

Résumé - Les trois principaux cours d'eau se jetant dans l'étang de Berre ont été soumis à des campagnes de prélèvements d'eau, en crue et en basses eaux, de septembre 1998 à décembre 2000. Ce suivi hydrosédimentaire a permis la quantification des flux de matières en suspension à partir des concentrations mesurées sur les échantillons d'eau. La méthode de calcul retenue pour la période des mesures met en œuvre une approche à pas de temps variable qui utilise tous les points de l'hydrogramme ayant servi à l'évaluation des écoulements. Afin d'étendre les calculs de flux dans le temps, 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 seconde approche, fondée sur les données pluviométriques (indice I_p), a été appliquée afin d'extrapoler les données mensuelles sur une période plus longue. Ainsi sur la période 1961-2000, les flux de MES évalués à partir des données pluviométriques atteignent 35,5 t/km²/an pour l'Arc, 17,4 t/km²/an pour la Touloubre et 47,7 t/km²/an pour la Cadière. Les quantités annuelles moyennes de MES apportées à l'étang de Berre par les cours d'eau avoisinent 40 000 tonnes.

Abstract - The three main streams flowing into the Étang de Berre have undergone water sampling at both high and low water periods from September 1998 to December 2000. This monitoring has permitted the quantification of flows of suspended materials from concentrations measured from the water samples. The measurements put into effect a step by step approach which used all points of the hydrogram in evaluating flow. In order to extend flow measurements over time, the daily flows were later correlated to an I_q index established from hydrological data, which translates the potential erosive power in the course of the day under consideration. A second approach, based on rainfall data (I_p index) was applied in order to extrapolate monthly data over a longer period. Thus, in the 1961-2000 period, flows of suspended materials evaluated from rainfall data reach 35.5 t/km²/yr for the Arc; 17.4 t/km²/yr for the Touloubre; and 47.7 t/km² for the Cadière. Average annual amounts of suspended materials flowing into the Étang de Berre from the these streams borders on 40 000 tons.

Introduction

L'étang de Berre est un vaste bassin d'eau saumâtre en communication avec la Méditerranée. Il se situe dans le Sud-Est de la France, et plus précisément dans la partie occidentale de la Provence calcaire. Exutoire de trois principaux cours d'eau : l'Arc, la Touloubre et la Cadière (fig. 1), il constitue un milieu côtier fragile. Depuis plusieurs décennies, l'étang de Berre connaît un profond dysfonctionnement, du fait d'une forte anthropisation de son bassin-versant et, à partir de 1966, des apports d'eau douce et de sédiments durantiens par le canal EDF.

Dans un contexte de colmatage progressif de l'étang, il s'avère particulièrement intéressant d'estimer

les flux de matières en suspension (MES) provenant des fleuves naturels se jetant dans l'étang et de les comparer avec ceux du canal EDF qui amène des eaux de la Durance pour faire fonctionner la centrale hydroélectrique de Saint-Chamas. Les apports de MES du canal sont surveillés et quantifiés par les services de EDF. Ils sont actuellement limités au maximum à 100 000 tonnes par an.

Dans le domaine méditerranéen français, les bassins-versants de la taille de ceux de l'Arc, de la Touloubre et de la Cadière (entre 720 et 73 km²) ont rarement fait l'objet de mesures des transports de MES. Les recherches sur l'érosion se sont concentrées soit sur des parcelles expérimentales ou des petits bassins-versants (GABERT, 1965 ; CLAUZON et VAUDOUR, 1971 ; BALLAIS,

* UMR 6012 ESPACE, Université de Provence, Aix-en-Provence, E-mail : mfiandin@club-internet.fr

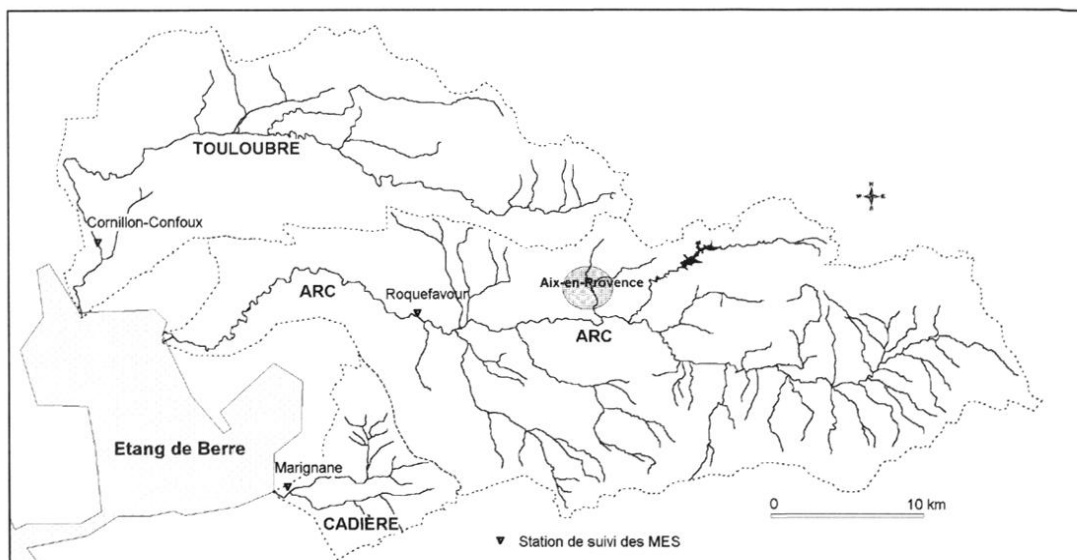


FIG. 1 - PRÉSENTATION DES BASSINS-VERSANTS

1993 ; MARTIN *et al.*, 1996), soit sur l'ensemble du bassin du Rhône (POINSART, 1992 ; PONT et BOMBLED, 1995) et sur ses affluents (ALARY, 1998 ; PEIRY, 1988). Par contre, de nombreuses études ont été menées sur des bassins de tailles semblables sur le pourtour méditerranéen : en Espagne (CONESA GARCIA, 1990), au Maghreb (PROBST et AMIOTTE SUCHET, 1992 ; SIBARI *et al.*, 2001).

Le présent article propose les résultats de travaux de recherche qui ont été menés dans le cadre d'une thèse (FIANDINO, 2003), destinés aux mesures des flux de MES provenant des fleuves vers l'étang de Berre et à leur extension dans le temps. Ces travaux de thèse ont également porté sur la détermination des relations entre les flux de MES et les caractères des bassins-versants.

1. Le terrain d'étude

Les bassins-versants de l'Arc, de la Touloubre et de la Cadière couvrent au total une superficie de 1193 km², soit 88 % du bassin-versant total de l'étang de Berre (fig. 1). 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 (bassin de l'Arc).

Les garrigues et les pinèdes couvrent de 42 à 50 % de la superficie de chacun des bassins-versants. La part des surfaces occupées par l'agriculture s'établit à 40 et à 53 % sur les bassins de l'Arc et de la Touloubre. Elle n'atteint que 25 % sur celui de la Cadière qui est le plus urbanisé (25 % de la superficie totale ; contre 10 et 4,5 % sur les deux autres bassins).

Les trois bassins sont soumis à un climat de type méditerranéen présentant des précipitations généralement abondantes en automne et une période sèche en été. Sur la période 1961-2000, les précipitations annuelles moyennes au cœur du terrain d'étude, à la station d'Aix-Galice, s'établissent à 616 mm (écart-type : 150 mm). Toutefois

les précipitations croissent d'ouest en est, les valeurs annuelles moyennes passant de moins de 550 mm sur le bassin de la Cadière, à plus de 800 mm à l'extrémité orientale du bassin de l'Arc. Ce gradient est à mettre en relation avec l'origine de la pluie (l'est) et le paramètre orographique.

À l'échelle journalière, les trois cours d'eau sont soumis à des crues particulièrement fortes en automne ou en hiver, en relation avec des précipitations à caractère orageux. S'abattant sur des versants peu protégés par la végétation, elles peuvent être la cause d'un ruissellement important, générateur d'une forte érosion. Le caractère variable des pluies dans le temps et dans l'espace, associé aux paramètres des bassins-versants, a une forte influence sur les phénomènes hydrosédimentaires de chaque bassin.

2. Les mesures

Un préleveur automatique d'échantillons d'eau a été implanté sur chaque cours d'eau, au niveau ou à proximité immédiate d'une station hydrométrique proche de l'embouchure :

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

Afin de vérifier la représentativité des points de prélèvements automatiques, des prélèvements manuels ont été effectués sur toute la largeur des cours d'eau au niveau de chaque station et à différentes profondeurs. Pour les trois stations, on peut estimer que les échantillons collectés par les préleveurs fournissent une estimation, avec un risque d'erreur de 5 %, de la concentration moyenne des MES sur la section transversale du cours d'eau au moment du prélèvement.

Les campagnes de prélèvements ont débuté en septembre 1998 sur la Touloubre et la Cadière, et en février 1999 sur l'Arc, et se sont achevées en décembre 2000.

Sur la période des mesures, une centaine d'événements pluviométriques ont été observés, parmi lesquels une trentaine ont engendré des crues. Toutes les crues importantes ont fait l'objet d'un suivi attentif, ces épisodes étant responsables de la majeure partie des transports de MES. Ainsi, 26 campagnes ont été réalisées sur l'Arc, 18 sur la Touloubre et 20 sur la Cadière. Des campagnes en basses eaux ont également été effectuées : 10 sur l'Arc, 16 sur la Touloubre et 11 sur la Cadière, afin de vérifier les apports de MES en dehors des crues.

Pour chaque crue ou pour chaque campagne en basses eaux, 24 à 48 échantillons ont été prélevés. 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 MES.

3. Les relations entre les concentrations des MES et les débits

Au cours de la période de mesures des MES, l'Arc et la Cadière présentent les plus fortes crues et les plus fortes concentrations des MES (tabl. 1).

En basses eaux, une partie plus ou moins importante de la charge solide provient 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 est forte pour la Cadière (tabl. 1), son bassin est le plus densément peuplé (densité de population de 1400 hab/km², contre 350 pour l'Arc et 250 pour la Touloubre).

Pour chaque cours d'eau et sur l'ensemble de la période de mesures, les concentrations des MES ne sont pas étroitement liées aux débits (fig. 2 à 4). Même en travaillant en coordonnées bi-logarithmiques (WALLING, 1971), les régressions apparaissent de qualité moyenne. Par contre, des auteurs ont montré qu'en travaillant crue par crue, les relations deviennent fortes, surtout lorsque les bassins-versants sont de petite taille (CORBONNOIS, 1991, 1998 ; BRAVARD et PETIT, 1997).

Les relations entre les concentrations mesurées et les débits instantanés ont donc été étudiées pour chaque épisode hydrologique (FIANDINO, 2003). Les relations entre les concentrations et les débits en crue mettent en évidence des coefficients de corrélation forts, aussi bien pour les crues très violentes, qui s'accompagnent de concentrations élevées (fig. 5), que pour des crues plus modestes, au cours desquelles les concentrations restent faibles. 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 (fig. 5).

TABL. 1 - PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES MESURES DE MES

	Arc	Touloubre	Cadière
Pointe de crue :			
Concentrations des MES	0,1 à 4 g/l	0,05 à 2,15 g/l	0,1 à 3,5 g/l
Débits instantanés	4 à 110 m ³ /s	4 à 15 m ³ /s	2 à 55 m ³ /s
Part de la matière organique dans les MES	5 à 15 %	7 à 15 %	15 à 30 %
Basses eaux :			
Concentrations des MES	0,01 et 0,04 g/l	0,04 et 0,08 g/l	0,03 et 0,06 g/l
Débits moyens	1,9 m ³ /s	2,7 m ³ /s	0,6 m ³ /s
Part de la matière organique dans les MES	10 à 29 %	6 %	46 %

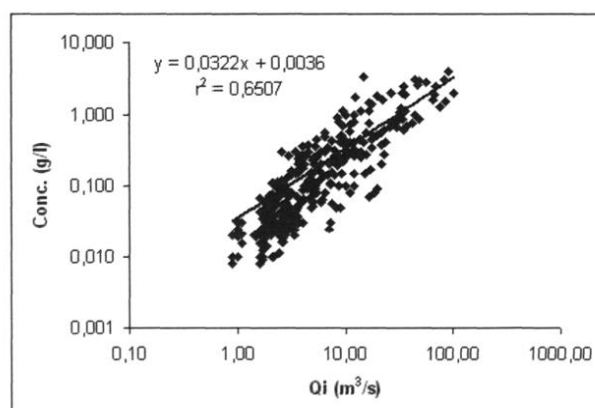
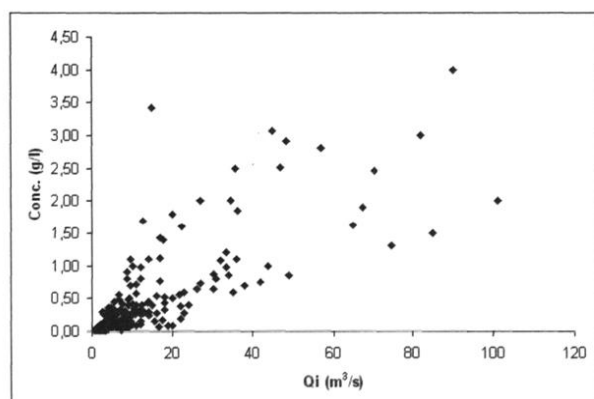


FIG. 2 - RELATIONS (LINÉAIRE ET BI-LOGARITHMIQUE) ENTRE LES CONCENTRATIONS DES MES (CONC.) ET LES DÉBITS INSTANTANÉS (QI) DE L'ARC

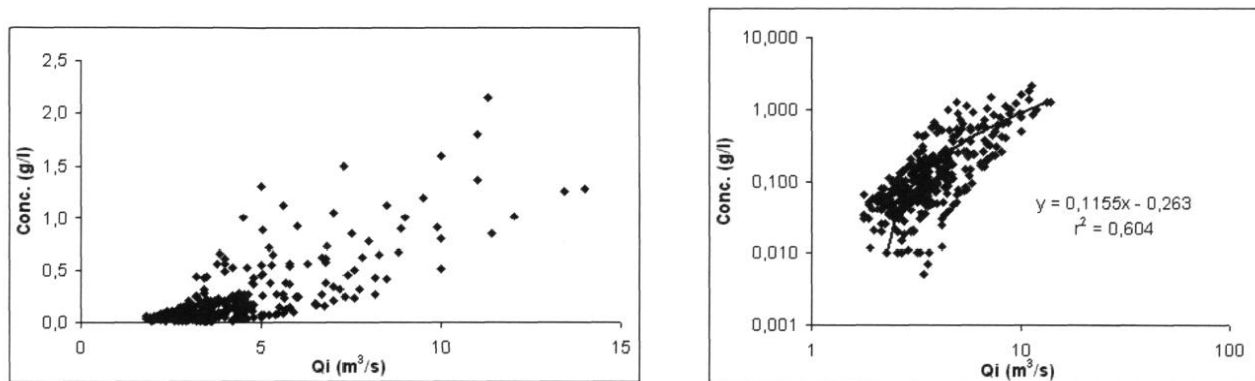


FIG. 3 - RELATIONS (LINÉAIRE ET BI-LOGARITHMIQUE) ENTRE LES CONCENTRATIONS DES MES (CONC.) ET LES DÉBITS INSTANTANÉS (QI) DE LA TOULOUBRE

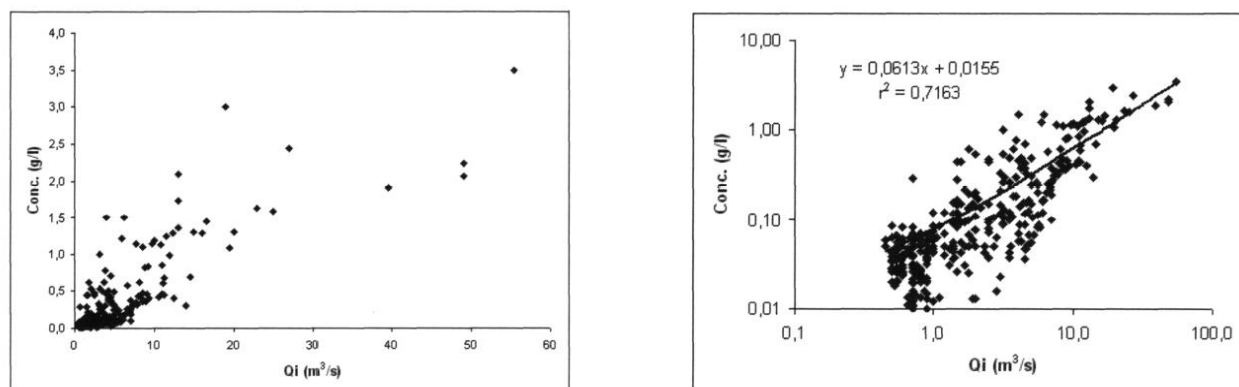


FIG. 4 - RELATIONS (LINÉAIRE ET BI-LOGARITHMIQUE) ENTRE LES CONCENTRATIONS DES MES (CONC.) ET LES DÉBITS INSTANTANÉS (QI) DE LA CADIÈRE

4. Calcul des flux de MES pendant la période de suivi

4.1. Le calcul des flux lors des crues et en basses eaux

Pour les épisodes de crue, les flux de particules en suspension sont déterminés à pas de temps variable (MARTIN, 1987 ; MARTIN *et al.*, 1996) en prenant 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 débits aux concentrations mesurées des MES pour l'épisode considéré. Les flux instantanés sont obtenus en multipliant les valeurs correspondantes du débit et de la concentration des MES.

En basses eaux, les relations entre les

concentrations et les débits n'étant pas très fortes, les flux journaliers de MES ont été estimés à partir de la moyenne des concentrations mesurées dans la journée (2 à 12 mesures par campagnes) et des débits moyens journaliers.

4.2. Les résultats

Les concentrations des MES et les débits des cours d'eau, recueillis au cours de la période de mesure, ont permis de déterminer les flux sédimentaires de chaque campagne de prélèvement. Le tableau 2 donne quelques exemples des résultats obtenus.

Les quantifications des flux montrent que l'Arc et la Cadière présentent les plus fortes érosions spécifiques (valeurs maximales en crue de l'ordre de 13 t/km² pour l'Arc et de 10 t/km² jusqu'à 38 t/km² pour la Cadière, contre 3 t/km² seulement pour la Touloubre). À cet égard,

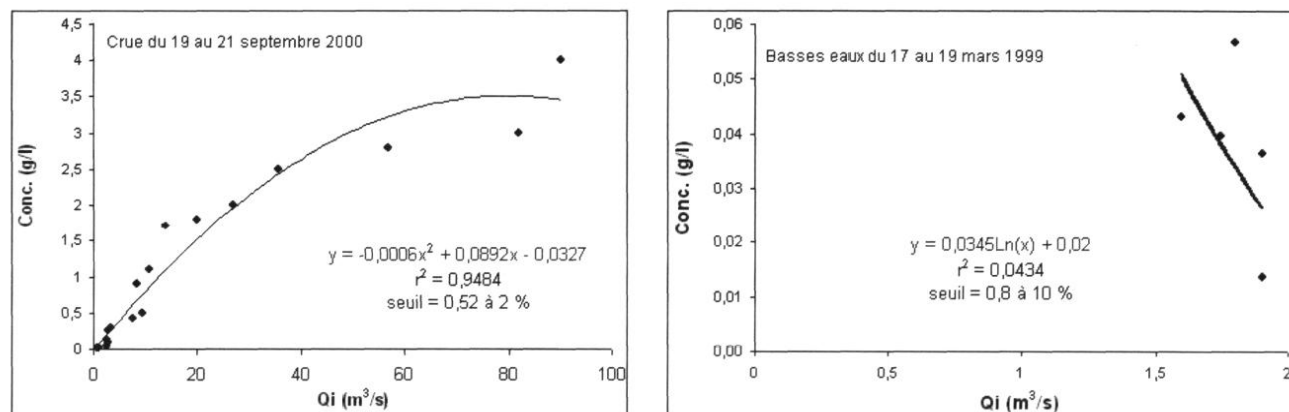


FIG. 5 - RELATION ENTRE LES CONCENTRATIONS (CONC.) ET LES DÉBITS INSTANTANÉS (QI) DE L'ARC, EN CRUE ET EN BASSES EAUX (seuil : seuil significatif avec un risque d'erreurs de x %)

c'est un épisode orageux particulièrement violent en septembre 1998 (146 mm en 24 heures dont 77 mm en une heure) qui a déterminé des taux d'érosion spécifique aussi élevés pour le bassin de la Cadière. Pour les bassins de l'Arc et de la Touloubre, les conditions pluviométriques ont été moins agressives, voire même déficientes dans le cas de la Touloubre.

À la grande variabilité spatiale des précipitations, s'ajoutent les caractères des bassins qui expliquent aussi les différences de réponse hydrosédimentaire ; le bassin de la Touloubre étant marqué par une étendue des zones sensibles à l'érosion plus réduite que pour les deux autres bassins (45 % contre 70 % pour le bassin de l'Arc et 60 % pour celui de la Cadière) (FIANDINO, 2003).

En dehors des périodes de crue, les cours d'eau évacuent également des MES (1 à 25 tonnes par jour), ce qui témoigne de l'existence d'apports indépendants des conditions hydroclimatiques, à l'évidence d'origine anthropique.

5. L'extension dans le temps des mesures de flux

Les premières recherches ont été réalisées en corrélant les concentrations des MES et les débits instantanés pour l'ensemble des crues observées pendant la période de mesures. Mais, pour chaque cours d'eau, nous avons obtenu des nuages de points très dispersés et des coefficients de corrélation médiocres, de l'ordre de 0,4 à 0,5. Après ces premiers essais infructueux, nous avons abordé le calcul 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 (LABORDE et MOUHOUS, 1998). 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. Face à la complexité des caractères des bassins, à leur état de surface et à la variabilité des pluies, il n'est donc pas aisé de déterminer des régressions qui fonctionnent bien lors de l'extension des calculs de flux.

Au final, les méthodes de calcul utilisées pour effectuer l'extension dans le temps des mesures de flux ont été développées en collaboration avec C. MARTIN (FIANDINO et MARTIN, 2004 ; FIANDINO et MARTIN, sous presse). Elles se rattachent à un type d'approche, qualifié d'empirique, mais qui en fait est le prolongement logique d'observations naturalistes. Ce type d'approche donne d'excellents résultats pour les parcelles expérimentales (WISCHMEIER et SMITH, 1960) et les petits bassins-versants (MARTIN *et al.*, 2000). Sa mise en œuvre, bien que plus délicate pour les bassins de plus grande taille (TOUAÏBIA et ACHITE, 2003) constitués de milieux variés et soumis à des précipitations dont la répartition spatiale est variable d'un épisode à l'autre, s'est révélée possible dans le cas du bassin-versant de l'étang de Berre (bassins-versants contrôlés = Arc : 650 km² ; Touloubre : 386 km² ; Cadière : 72,4 km² et rang = Arc : 4 ; Touloubre : 3 ; Cadière : 3).

5.1. Relations entre les flux de MES et les conditions hydrologiques

La démarche s'appuie sur les valeurs journalières des flux de MES calculées à partir des données recueillies lors des campagnes de prélèvements (débits instantanés et concentrations mesurées des MES). Pour les basses eaux, les flux journaliers de MES sont corrélés aux débits journaliers. Pour les crues, un indice (Iq) est calculé dans le but de traduire l'influence des phénomènes érosifs. Il peut prendre deux formes :

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

– où Q_j est le débit journalier (en m³/s), Q_{imax} le débit maximum instantané (en m³/s), DQ la différence entre les débits instantanés maximum et minimum (en m³/s), sachant que $a + b = 1$.

TABL. 2 - QUELQUES RÉSULTATS DES CAMPAGNES DE MESURES DES MES DE SEPTEMBRE 1998 À DÉCEMBRE 2000, LORS DES CRUES ET EN BASSES EAUX

	Arc	Touloubre	Cadière
Crues principales	<i>19 au 21-09-2000</i>	<i>8 au 10-08-1999</i>	<i>7 au 8-09-1998</i>
Q _{imax}	90,5 m ³ /s	11,3 m ³ /s	55,3 m ³ /s
C MES _{max}	4,0 g/l	2,15 g/l	3,5 g/l
F MES	6420,5 t	709 t	2797 t
Erosion spécifique	9,9 t/km ²	1,8 t/km ²	38,6 t/km ²
	<i>24 au 28-12-200</i>	<i>24 au 27-12-2000</i>	<i>13 au 15-10-2000</i>
Q _{imax}	107 m ³ /s	12,9 m ³ /s	40,3 m ³ /s
C MES _{max}	2,0 g/l	1,9 g/l	1,9 g/l
F MES	8541,5 t	1109 t	741,5 t
Erosion spécifique	13,1 t /km ²	2,9 t /km ²	10,2 t /km ²
Basses eaux			
Q _{moy}	1,8 m ³ /s	2,7 m ³ /s	0,6 m ³ /s
C MES _{moy}	0,03 g/l	0,06 g/l	0,05 g/l
F MES/j	0,8-10,8 t	6,5-25,9 t	1,1-4,6 t

Q_{imax} : Débit instantané maximal en m³/s ; C MES_{max} : Concentration des MES maximale en g/l ; F MES : Flux des MES en tonnes ; Q_{moy} : Débit moyen en m³/s ; C MES_{moy} : Concentration des MES moyenne en g/l ; F MES/j : Flux des MES journaliers en tonnes.

**TABL. 3 - LOIS GÉNÉRALES DE FONCTIONNEMENT HYDROSÉDIMENTAIRE DES COURS D'EAU
D'APRÈS LES CONDITIONS HYDROLOGIQUES**

Fleuve	Crues	Faibles écoulements
Arc	$Fj = 0,79560 Iq^2 + 123,09729 Iq - 733,10436$ $r = 0,95$, $r^2 = 0,91$ et seuil = 0,41 à 2%, avec $Iq = (0,8 Qj + 0,2 Qimax) \times (DQ/Qimax)$	$Fj = 9,5315 Qj - 9,0776$ $r = 0,82$, $r^2 = 0,68$ et seuil = 0,3 à 2%
Touloubre	$Fj = 1,2249 Iq^3 - 10,574 Iq^2 + 56,074 Iq - 81,957$ $r = 0,95$, $r^2 = 0,90$ et seuil = 0,36 à 2 %, avec $Iq = 0,7 Qj + 0,3 Qimax$	$Fj = 8,2907 Qj - 8,5894$ $r = 0,77$, $r^2 = 0,60$ et seuil = 0,5 à 2 %
Cadière	$Fj = 0,1795 Iq^3 - 3,1021 Iq^2 + 46,7 Iq - 45,313$ $r = 0,98$, $r^2 = 0,97$ et seuil = 0,36 à 2%, avec $Iq = (0,65 Qj + 0,35 Qimax) \times (DQ/Qimax)$	$Fj = 3,9371 Qj$ $r = 0,91$, $r^2 = 0,82$ et seuil = 0,44 à 2 %

Fj : flux journalier de MES (tonnes). *Iq* : indice traduisant l'agressivité érosive journalière potentielle. *Qj* : débit journalier (m³/s). *Qimax* : débit instantané maximum le jour considéré (m³/s). *DQ* : différence entre les débits instantanés maximum et minimum (m³/s). *r* : coefficient de corrélation. *r²* : coefficient de détermination. seuil : seuil significatif avec un risque d'erreurs de *x* %.

Le tableau 3 présente les équations retenues pour les trois cours d'eau. Dans tous les cas, les corrélations entre les flux sédimentaires et les paramètres hydrologiques sont assez bonnes. La figure 6 montre la qualité des ajustements de l'Arc, pour les crues et les faibles écoulements.

5.2. Relations entre les flux de MES et les conditions pluviométriques

Sur la période 1998-2000, le choix s'est porté sur une approche permettant de reconstituer directement les flux mensuels de MES (MARTIN *et al.*, 2000). Les valeurs mensuelles de flux ont été déterminées à partir des valeurs mesurées lors des campagnes de prélèvements et des valeurs journalières calculées à l'aide des régressions entre les flux et les débits pour les périodes sans prélèvements. Les flux mensuels de MES ainsi déterminés sont corrélés aux pluies journalières maximales des mois correspondants, à travers un indice (*Ip*) représentant l'agressivité potentielle des pluies au cours du mois :

- $Ip = a Pmjs + b Pnj$
- où *Pmj* et *Pnj* sont les pluies maximales (en mm) en *m* jours successifs et *n* jours non consécutifs au cours du mois, sachant que $a + b = 1$.

Pour les bassins de l'Arc et de la Touloubre, plusieurs jeux de stations météorologiques ont été testés (FIANDINO, 2003). Au final, pour tous les bassins-versants, la meilleure relation se trouve être celle avec une seule

station. Les équations retenues pour l'extension dans le temps des flux de MES sont présentées dans le tableau 4. Les ajustements correspondant à ces équations sont portés sur la figure 7, avec un intervalle de confiance de 80 %. Il ressort que les relations ne sont pas très fortes pour l'Arc et pour la Touloubre. Elles sont beaucoup plus étroites dans le cas de la Cadière.

Pour la Cadière, au vu de la forte valeur de flux (équation 3 : tabl. 4 et fig. 7) qui risque de surestimer les résultats, un test a été réalisé sans cette valeur (équation 4). Les résidus obtenus avec les deux équations sont sensiblement les mêmes, donc l'équation 3 a été retenue puisqu'elle prend en compte une gamme plus large de situations hydrosédimentaires.

5.3. Comparaison des résultats obtenus avec 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

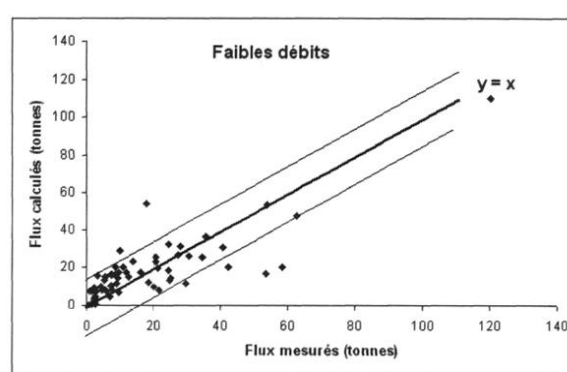
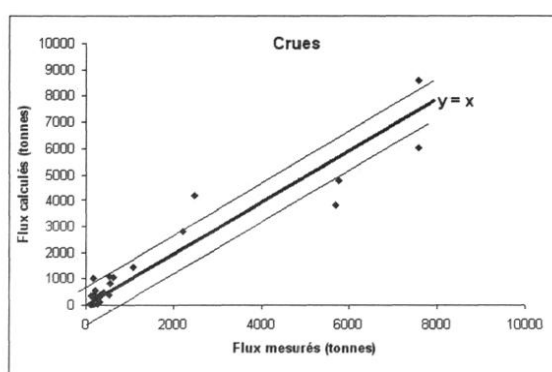


FIG. 6 - ARC : COMPARAISON ENTRE LES FLUX JOURNALIERS DE MES (TONNES) CALCULÉS À PARTIR DES DONNÉES HYDROLOGIQUES (FLUX CALC.) ET LES FLUX MESURÉS (FLUX MES), AVEC UN INTERVALLE DE CONFIANCE DE 80 %

TABL. 4 - LOIS GÉNÉRALES DE FONCTIONNEMENT HYDROSÉDIMENTAIRE
DES COURS D'EAU D'APRÈS LES CONDITIONS PLUVIOMÉTRIQUES

Fleuve	Équation	r	r ²	seuil à 5 %
Arc (station : Aix-Galice)	$F_m = 0,413 I_p^3 + 19,78 I_p$, (Equation 1) $I_p = (0,2 P_{2js}) + (0,8 P_{4j})$	0,80	0,64	0,42
Touloubre (station : Salon)	$F_m = 10,284 P_{2js} + 284,7$, (Equation 2)	0,64	0,41	0,38
Cadière (station : Marignane)	$F_m = 0,0013 I_p^3 - 0,1658 I_p^2 + 12,667 I_p$, (Equation 3) $I_p = (0,6 P_{2js} + 0,4 P_{4j})$ $F_{\text{mois}} = 6,9964 I_p + 33,4911$, (Equation 4) avec $I_p = (0,6 P_{2jc} + 0,4 P_{4j})$	0,96 0,73	0,92 0,54	0,38 0,38

F_m : flux mensuel de MES (tonnes). 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). r : coefficient de corrélation. r^2 : coefficient de détermination. seuil : seuil significatif avec un risque d'erreurs de x %.

sols ; répartition des pluies dans le temps et dans l'espace ; intensité des pluies ; état de surface des sols et taux de couverture végétale, 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 pluviométriques en les comparant à celles appuyées sur les données hydrologiques (tabl. 5). 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.

5.4. Interprétation des résultats

Pour l'Arc et la Cadière, les épisodes de crue (5 à 12 crues) sont responsables chaque année de 50 à 80 % des exportations de MES (sur 25 à 35 % des jours). La Touloubre présente un fonctionnement hydrosédimentaire différent, 30 à 50 % seulement des flux annuels de MES étant liés aux crues (4 à 12 crues).

Pour les trois cours d'eau, le reste des flux de MES provient des rejets des stations d'épuration et des rejets domestiques directs, qui sont répartis sur toute l'année et qui sont indépendants des crues. Pour la Touloubre, des apports parasites de MES supplémentaires sont produits par les rejets des canaux d'irrigation d'avril à octobre (les eaux chargées des canaux peuvent avoir des concentrations de MES comprises entre 0,03 et 0,06 g/l).

Sur la période de mesure des MES, les bassins de l'Arc et de la Cadière présentent les plus forts taux d'érosion spécifiques annuels moyens avec 36,2 t/km² et 56,9 t/km². Le taux d'érosion spécifique du bassin de la Touloubre est de 16,8 t/km²/an.

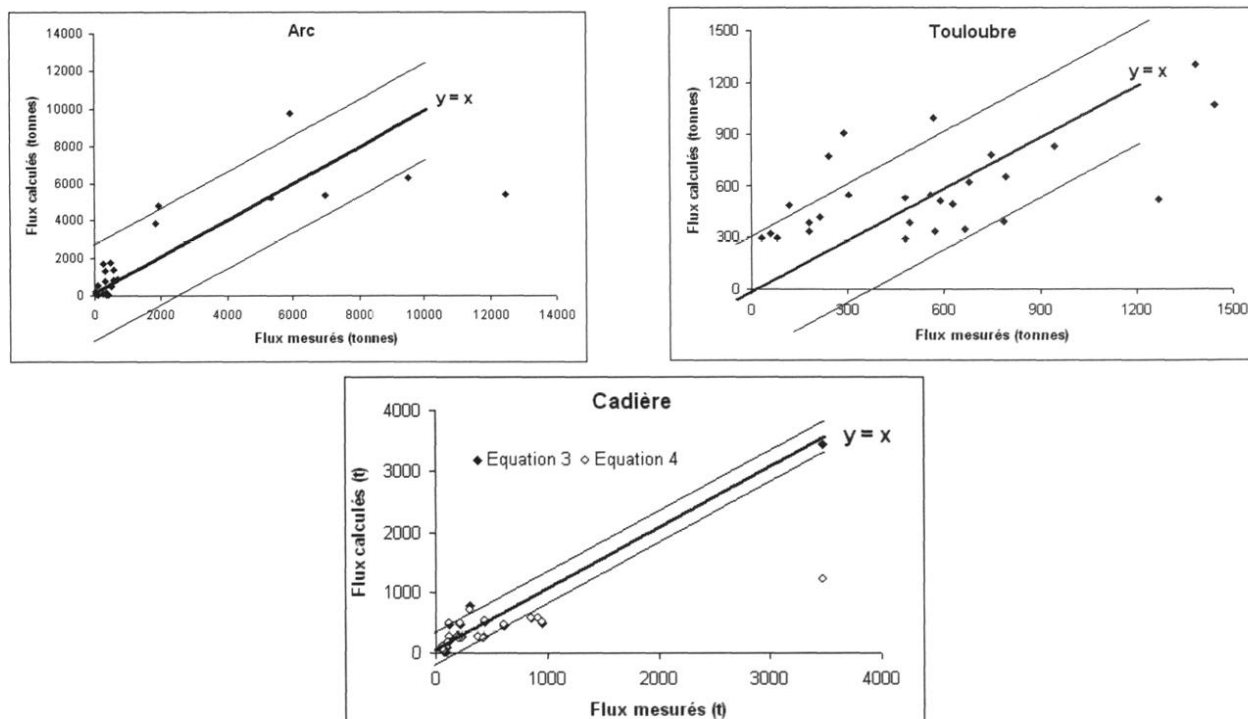


FIG. 7 - COMPARAISON ENTRE LES FLUX MENSUELS DE MES (TONNES) CALCULÉS À PARTIR DES PLUVIOMÉTRIQUES (FLUX CALC) ET LES FLUX QUI ONT SERVI À LA RÉALISATION DES ÉQUATIONS (FLUX MES), AVEC UN INTERVALLE DE CONFIANCE DE 80 %

TABLE. 5 - COMPARAISON DES FLUX ANNUELS DE MES CALCULÉS A L'AIDE DES ÉQUATIONS ÉTABLIES À PARTIR DES DONNÉES HYDROLOGIQUES ET PLUVIOMÉTRIQUES

Fleuve	Période	FluxQ (t)	FluxQ (t)/an	FluxP (t)	FluxP (t)/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). *ÉcartP/Q* : écart entre *FluxP* et *FluxQ*, exprimé en % de la valeur de *FluxQ*.

La faible réponse hydrosédimentaire de la Touloubre est le reflet des paramètres naturels et anthropiques caractéristiques du bassin (faibles pentes, substrat peu fragile, zones susceptibles de fournir des matériaux compartimentés, aménagements) et des conditions pluviométriques que l'on peut qualifier de déficientes sur la période de mesures (FIANDINO, 2003). Pour l'Arc et la Cadière, les réponses hydrosédimentaires sont à mettre en relation avec des conditions pluviométriques et des paramètres des bassins (pentes fortes, terrains cultivés, zones dépourvues de végétation naturelle, substrats argileux et marneux, sols profonds et peu caillouteux, débits de crue importants) plus favorables aux phénomènes d'érosion.

Sur la période 1961-2000, l'extension des mesures de flux appuyée sur les données pluviométriques fournit des taux d'érosion spécifique moyens de :

- 35,5 t/km²/an pour l'Arc (écart-type : 14,4 t/km²/an, Précipitations annuelles moyennes : 616 mm à Aix-Galice) (fig. 8) ;
- 17,4 t/km²/an pour la Touloubre (écart-type : 2,3 t/km²/an, P : 603 mm à Salon-de-Provence) ;
- 47,7 t/km²/an pour la Cadière (écart-type : 22,7 t/km²/an, P : 546 mm à Marignane).

Ces valeurs reconstituées sont représentatives à la fois des conditions pluviométriques sur la période d'extension des calculs de flux et des caractères des bassins-versants sur la période de mesure des flux (occupation du sol, aménagements, formes d'érosion préexistantes en cours d'évolution).

En terme de dégradation spécifique, les trois cours d'eau se placent en position moyenne par rapport aux fleuves et rivières français (Seine : 7,5 à 9 t/km²/an - AVOINE, 1985 ; Garonne : 20,7 t/km²/an - PROBST, 1983). Toutefois les valeurs obtenues sont sans commune mesure

avec ce que l'on peut observer sur le pourtour méditerranéen (jusqu'à 1670 t/km²/an, dans le cas de l'oued Nekkor au Maroc - MARZOUKI, 1992).

Conclusion

La quantification des flux de MES à partir des hydrogrammes et des mesures des concentrations des MES 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.

La période de mesures des flux de MES étant relativement courte, 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 les conditions hydrologiques et pluviométriques sur de plus longues périodes. 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, elles portent généralement sur des périodes plus longues que celles des données hydrologiques.

Les reconstitutions des flux annuels de MES sont plus fiables avec les données hydrologiques qu'avec les données pluviométriques. Au total, les deux méthodes utilisées fournissent des valeurs annuelles moyennes assez proches. C'est en tout cas ce qui se passe pour la Cadière sur la période 1984-2000.

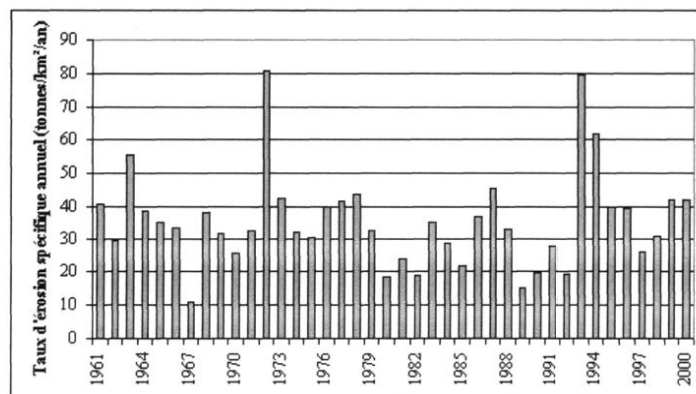


FIG. 8 - TAUX D'ÉROSION SPÉCIFIQUE ANNUELS DE L'ARC À ROQUEFAVOUR SUR LA PÉRIODE 1961-2000

Les flux de MES annuels moyens évalués à partir des données pluviométriques sur la période 1961-2000, s'établissent à 23102 tonnes pour l'Arc à Roquefavour, 6715 tonnes pour la Touloubre à Cornillon-Confoux et 3456 tonnes pour la Cadière à Marignane. La superficie contrôlée par les stations de mesure (1108 km²) couvre 81 % de la surface totale du bassin-versant de l'étang de Berre (soit 1365 km²). En appliquant aux 257 km² restant, les taux d'érosion annuels moyens le plus faible (17,4 t/km²) et le plus fort (47,7 t/km²) trouvés pour les trois bassins-versants, les apports de MES à l'étang de Berre en provenance du bassin apparaissent compris entre 37 730 et 45 520 tonnes, ce qui représente 27 à 31 % des entrées de MES dans l'étang. Le reste, soit 100 000 tonnes au maximum, est fourni chaque année par le canal EDF. Les apports de MES par les fleuves naturels à l'étang de Berre ont certes des conséquences néfastes dans le contexte des risques qui pèsent sur l'état écologique de l'étang de Berre, mais ils ne présentent en eux-mêmes aucun caractère exceptionnel. En effet, au regard des apports duranciens des quarante dernières années, la part des fleuves naturels est parfois très faible, puisque dans les années 1970 le canal EDF a apporté près de 800 000 tonnes de limons.

Dans le contexte de colmatage progressif du fond de l'étang, la mise en service de la centrale EDF de Saint-Chamas en 1966 contribue donc grandement à l'accélération de l'envasement (envasement moyen de 46 cm au nord et 23 cm au sud de 1962 à 1992, contre 15 cm d'envasement moyen de 1925 à 1962 – GARLAN, 1992). Toutefois l'envasement progressif a été observée dans une moindre mesure depuis le milieu du XIX^e siècle (ROUX, 1983). Ce phénomène est sans doute à mettre en relation avec l'approfondissement du canal de Caronte et la relative reconnexion avec la Méditerranée, ainsi que la forte croissance démographique du bassin-versant et des rives de l'étang de Berre.

Au niveau écologique, ce n'est pas tant les flux de MES des fleuves naturels qui contribuent à la dégradation du milieu, mais plutôt les apports massifs de limons duranciens. Ceux-ci ont un impact négatif sur la faune et la flore aquatiques, en augmentant la turbidité de l'eau et en colmatant les fonds.

En fait, les problèmes écologiques de l'étang trouvent leur origine dans une multitude de causes en relation avec la très forte anthropisation du milieu :

- des rejets industriels et des apports atmosphériques, des éléments nutritifs et des matières organiques apportés par les cours d'eau, qui engendre une pollution chimique de l'étang très marquée à partir des années 1950,
- la mise en service de la centrale hydroélectrique de Saint-Chamas en 1966 qui a une double répercussion (ROUX, 1983) : les eaux douces de la Durance sont déversées dans l'étang en très grandes quantités (près de 3 à 4 fois le volume de l'étang chaque année) et de manière très variable (le débit du canal usinier étant fort de novembre à mai et faible de juin à octobre), ce qui entraîne une diminution brutale de la salinité de l'étang dès 1966 et de fortes variations saisonnières et interannuelles. De plus, les eaux sont parfois très chargées en suspensions, en

particulier à la suite des crues de la Durance, comme nous venons de le citer.

La situation écologique particulièrement préoccupante de l'étang de Berre a conduit le gouvernement et les acteurs locaux à mettre en place des structures d'études, de concertation et d'aménagement et à dresser un plan de reconquête depuis les années 1990. Ces mesures visent à réduire les pollutions urbaines et industrielles, les apports d'eau douce et de limons duranciens. À l'heure actuelle, l'état de l'étang s'est nettement amélioré avec la mise en place de stations d'épuration sur la quasi-totalité des communes du bassin-versant de l'étang de Berre, des usines et des entreprises, limitant les apports en éléments nutritifs et en polluants. Les apports en eau douce et en limons du canal EDF ont beaucoup diminué, ils sont actuellement limités à 2,1 milliards de m³ par an pour l'eau douce et à 100 000 tonnes en moyenne par an pour les limons.

L'étang de Berre reste malgré tout soumis à un profond dysfonctionnement qui se manifeste par une stratification des eaux et des modifications brutales de la salinité (dues aux variations saisonnières très fortes des débits des rejets EDF), un envasement accéléré depuis la mise en place de la centrale EDF, une pollution chimique et bactériologique persistante, un déséquilibre écologique, des potentialités faibles de régénération des fonds (AUGIER, 1996). Toutefois, même si l'étang reste encore dégradé, on peut parler d'amélioration de la qualité des eaux et du milieu. Les efforts de dépollution consentis par les communes et les industries du bassin-versant ont conduit à une prise de conscience générale pour la reconquête et la réhabilitation de l'étang.

Dans le cadre d'une volonté de réhabilitation et de restauration du milieu écologique de l'étang de Berre, la quantification des flux de MES de l'Arc, de la Touloubre et de la Cadière permet de mieux comprendre les phénomènes hydrosédimentaires à l'échelle des bassins et de mieux appréhender la part des exportations de MES des différents organismes dans l'étang. Ainsi, pour réaliser une gestion rationnelle des flux de MES vers l'étang, il faudra prendre en compte toutes les entrées sédimentaires, non seulement les limons duranciens apportés par le canal EDF, mais aussi les flux de MES transportés par les cours d'eau drainant le bassin de l'étang de Berre.

Les mesures à prendre pour diminuer les apports de sédiments par les fleuves côtiers exigeraient la mise en œuvre de moyens agissant à différents niveaux sur les bassins-versants, afin de limiter tout à la fois la mobilisation des matériaux sur les versants (en particulier des terres agricoles), leur transfert vers les cours d'eau et leur évacuation jusqu'à l'étang de Berre, et globalement d'améliorer le fonctionnement hydraulique et sédimentaire des cours d'eau.

Remerciements - Ce travail a bénéficié du soutien de l'ANRT, de la Société Safège-Cetiis, de l'Agence de l'Eau RMC, d'EDF, des Syndicats de l'Arc, de la Touloubre et de la Cadière, du Conseil général des Bouches-du-Rhône, du Conseil régional, de la DIREN, des Services Maritimes et du GIP pour la réhabilitation de l'étang de Berre. Je dois un grand merci à C. MARTIN pour son aide et ses encouragements.

BIBLIOGRAPHIE

- ALARY C., (1998), *Mécanismes et bilans d'érosion dans un bassin-versant méditerranéen aménagé : le cas de la Durance (S-E France)*, Thèse de l'Université d'Aix-Marseille II, 276 p. et annexes.
- AUGIER H., (1996), L'étang de Berre et sa réhabilitation : bilan enjeu, prospective, *J. Rech. Océanographique*, Vol. 21, n° 1 et 2, p. 1-8.
- AVOINE J., (1985), *Évaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de la Seine, La Baie de Seine : Fonctionnement, conséquences en matière d'environnement et d'utilisation de la mer*, Vol. 2, CNRS, Université de Caen, p. 61-68.
- BALLAIS J.-L., (1993), L'érosion consécutive à l'incendie d'août 1989 sur la montagne Sainte-Victoire : trois années d'observations (1989-1992), *Bull. Assoc. Géogr. Fr.*, Vol. 70, n° 5, p. 423-437.
- BRAVARD J.P. et PETIT F., (1997), *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*, A. Colin, 222 p.
- CLAUZON G., VAUDOUR J., (1971), Ruissellement, transports solides et transports en solution sur un versant aux environs d'Aix-en-Provence, *Revue de Géographie Phys. et de Géol. Dynamique*, vol. XIII, fasc. 5, p. 489-504.
- CONESA GARCIA C., (1990), Érosion du sol et sédimentation fluviale dans les «ramblas» du Sud-Est espagnol, *Méditerranée*, n° 3-4, p.63-74.
- 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.).
- FIANDINO M. et MARTIN C., (2004), Quantification des flux de matières en suspension de trois fleuves côtiers méditerranéens (bassin de l'étang de Berre) : approche méthodologique, *Études de Géographie Physique*, n° XXXI, p. 71-86.
- FIANDINO M. et MARTIN C., (ss presse), *Flux de matières en suspension des fleuves côtiers se jetant dans l'étang de Berre (Bouches-du-Rhône, France)*, La Houille Blanche.
- GABERT P., (1965), Recherches sur l'érosion dans deux bassins expérimentaux sous climat méditerranéen, région d'Aix-en-Provence, *Publ. 66 de l'AIHS, Symposium de Budapest*, p. 380-387.
- GARLAN T., (1992), *Évolution de la bathymétrie de l'étang de Berre*, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) et EDF, 13 p., cartes et annexes.
- LABORDE J.-P., MOUHOUS N., (1998), *Notice d'utilisation du logiciel Hydrolab*, UPRESA 6046 du CNRS Analyse Spatiale, Université de Nice-Sophia-Antipolis, Nice, 45 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), *Z. für Geomorph.*, N.F., vol. 31, n° 1, p. 73-84.
- MARTIN C., avec la collab. de BÉGUIN E., 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.
- MARZOUKI T., (1992), Diagnostic de l'envasement des grands barrages marocains, Recommandations et journée d'étude sur l'érosion du sol et envasement des barrages, *Revue Marocaine Génie Civil*, 38 p.
- PEIRY J.-L., (1988), *Approche géographique de la dynamique spatiotemporelle des sédiments d'un cours d'eau intramontagnard : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie)*, Thèse de l'Université Jean Moulin, Lyon 3, 363 p.
- POINSART D., (1992), *Effets des aménagements fluviaux sur les débits liquides et solides, Exemple du Rhône dans les plaines de Miribel-Jonage et de Donzère-Mondragon*, Thèse de doctorat, Université de Lyon III, 501 p.
- PONT D., BOMBLED B., (1995), Les débits solides du Rhône à proximité de son embouchure durant l'année hydrologique 1994-1995, *Actes des 7^e Rencontres de l'Agence régionale pour l'environnement PACA*, 24-27 octobre 1995 à Digne-les-Bains, p. 283-292.
- PROBST J.-L., (1983), *Hydrologie du bassin de la Garonne. Modèles de mélange. Bilan de l'érosion, exportation des phosphates et des nitrates*, Thèse de l'Université P. Sabatier, Toulouse, 148 p.
- PROBST J.-L., AMIOTTE SUCHET P., (1992), Fluvial sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa), *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 37, n° 6, p.621-637.
- ROUX R.-M., (1983), *Les apports liquides et solides du canal EDF de St-Chamas dans l'étang de Berre*, Centre d'Océanologie de Marseille, URA 41, 69 p. et annexes.
- SIBARI H., HAIDI S., AIT FORA A., (2001), Typologie des crues et érosion mécanique dans un bassin-versant de zone semi-aride : bassin-versant de l'Inaouène, Maroc, *Sécheresse*, Vol. 12, n° 3, p. 187-193.
- TOUAÏBIA B. et ACHITE M., (2003), Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin-versant de l'oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale, *Hydrol. Sci. J.*, vol. 48, n° 2, p. 235-242.
- WALLING D.E., (1971), Sediment dynamics of small instrumented catchments in South-East Devon, *Transactions of the Devonshire Association*, vol. 103, p. 147-165.
- WISCHMEIER W.H. & SMITH D.D., (1960), An universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning, *7th Intern. Congr. Soil Sci.*, vol. I, p. 418-425.