CARTOGRAPHIE DES ZONES POTENTIELLEMENT ÉRODABLES DANS TROIS BASSINS VERSANTS MÉDITERRANÉENS (ÉTANG DE BERRE, BOUCHES-DU-RHÔNE, FRANCE)

Mirabelle FIANDINO (1)

(1) : Montée de Bel Air, Chemin de Pédeguien, 13390 AURIOL.
Courriel : mfiandin@club-internet.fr .

RÉSUMÉ : Situé dans le Sud-Est de la France, l'Étang de Berre est l'exutoire de trois cours d'eau à régime méditerranéen marqué (Arc, Touloubre et Cadière). Nous proposons une méthode d'identification des zones potentiellement productrices de matériaux sur les versants et d'évaluation des transferts de ces matériaux dans les réseaux fluviaux élémentaires. Elle s'appuie sur le croisement des facteurs de l'érosion hydrique (pente, lithologie, pédologie, couvert végétal), d'une part, et sur le croisement des facteurs de transfert dans les drains (pente longitudinale, densité des fossés, ripisylve), afin de déterminer la capacité d'évacuation des drains, d'autre part.

MOTS-CLÉS : bassin versant, cartographie, érosion hydrique des sols, flux de matières en suspension, cours d'eau méditerranéen, Étang de Berre.

ABSTRACT : Located in the South-East of France, the Étang de Berre acts as a discharge system of three main rivers presenting a mediterranean flow (Arc, Touloubre and Cadière). We propose a method of cartography of the surfaces potentially affected by water erosion and an assessment of transport of matter in little rivers. Our method consists in the overlay of the factors of erosion (rain, slope, lithology, pedology, land cover), and the overlay of the factors of transport in streams (slope, density of the ditches, vegetation of bank), in order to determine their capacity of evacuation.

KEY-WORDS : catchment area, mapping, soil erosion, suspended load discharge, Mediterranean river, Étang de Berre.

I - INTRODUCTION

L'étude des transferts de matière des versants vers les cours d'eau est complexe, car ils sont sous l'influence d'un grand nombre de paramètres tels que la topographie, les états de surface des sols, les variables hydro-climatiques et les contraintes anthropiques (J. CORBONNOIS, 1998 ; É. ROOSE *et al*., 1998). Le secteur d'étude est le bassin versant de l'Étang de Berre. Exutoire de trois cours d'eau, l'Arc, la Touloubre et la Cadière (Fig. 1et 2), il constitue un vaste bassin d'eau saumâtre (155 km^2 ; 980 millions de m^3 d'eau) qui communique avec la Méditerranée par la passe de Caronte. Depuis plusieurs décennies, le fonctionnement de l'Étang subit les effets de la forte anthropisation de son bassin versant et des apports d'eau douce et de sédiments en provenance de la Durance, à la suite de la mise en route en 1966 de la centrale hydro-électrique EDF de Saint-Chamas. Nos recherches sur l'érosion mécanique (M. FIANDINO, 2003) s'intègrent à un ensemble d'investigations menées par les syndicats de rivière de l'Arc, de la Touloubre et de la Cadière, de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, du GIP pour la réhabilitation de l'Étang de Berre, en vue d'une meilleure gestion et de la réhabilitation de l'Étang de Berre.

II - CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET ANTHROPIQUES DES BASSINS VERSANTS

Les bassins versants de l'Arc, de la Touloubre et de la Cadière (Fig. 2) couvrent au total une superficie de 1193 km^2, soit 88 % du bassin versant total de l'Étang de Berre. Ils s'inscrivent dans une région de collines (altitude maximum : 1011 m dans le massif de la Sainte-Victoire), modelée dans un substrat sédimentaire (calcaires, marnes et argiles) et soumise à un climat de type méditerranéen.

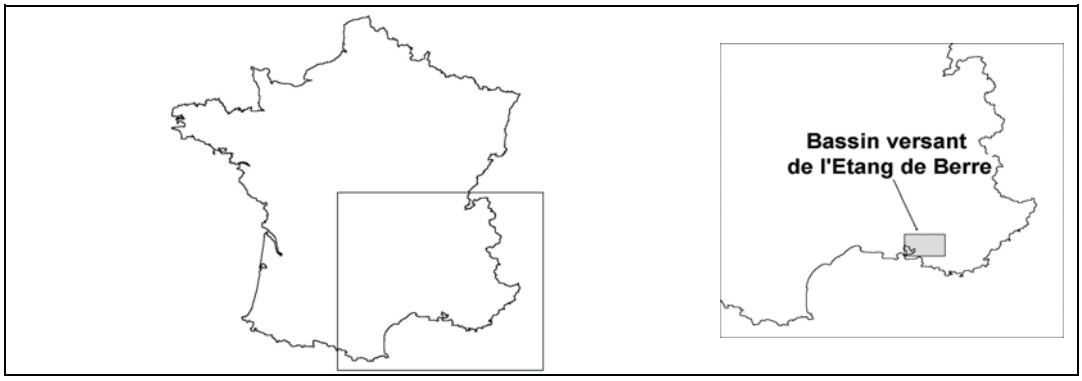

Figure 1 - Localisation du bassin versant de l'Étang de Berre.

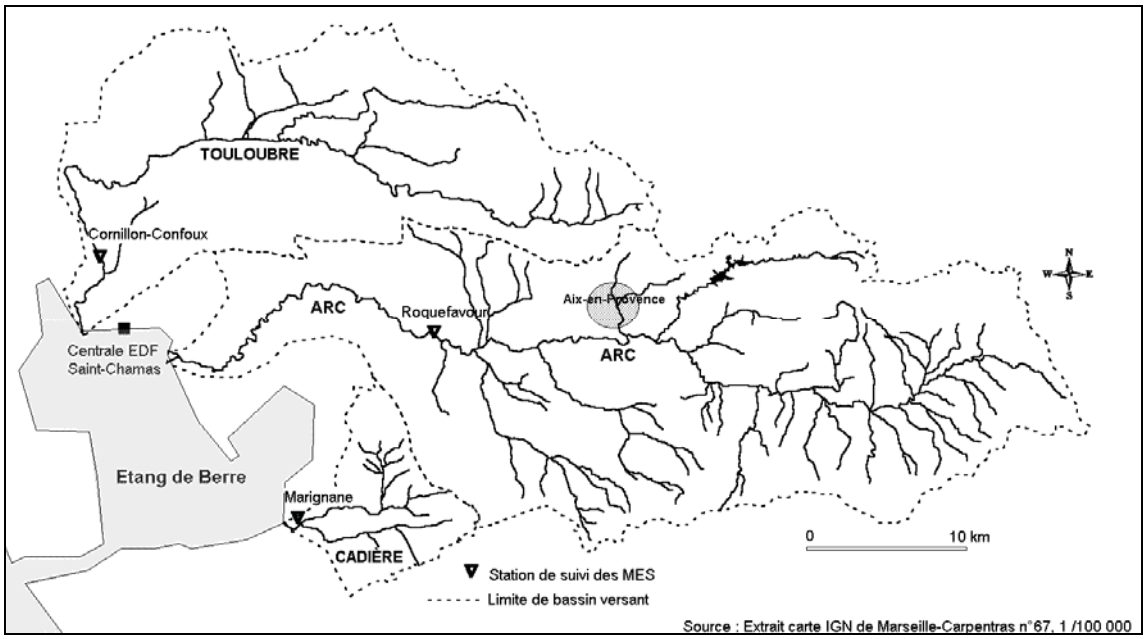

Figure 2 - Localisation des bassins versants étudiés.

Le bassin de l'Arc, le plus grand des trois (720 km^2), s'inscrit dans le synclinal d'Aix-en-Provence, dont le cœur est façonné dans les argiles et les marnes du Crétacé supérieur, de l'Éocène et de l'Oligocène, alors que les principaux reliefs (massifs de la Sainte-Victoire et de l'Aurélien) sont formés de calcaires du Jurassique. Les reliefs ont des pentes fortes comprises entre 10 et 15°, pouvant aller jusqu'à 25 à 30°, et sont couverts de pinèdes et de garrigue. La plaine alluviale, dont les pentes sont très faibles (0,2 à 3°) et les sols plus profonds, porte la plupart des terres agricoles (céréales, vignes et vergers). L'urbanisation est peu développée (10 % de la superficie totale), mais la densité de population atteint 350 habitants/km^2. À plusieurs reprises (août 1989, août 1995 et juillet 1997), des incendies ont détruit la végétation naturelle, favorisant l'érosion mécanique. Ainsi, dans certains secteurs, en particulier sur le versant sud de la Sainte-Victoire (J.L. BALLAIS, 1993), des ravines ont été réactivées. Leur développement a ensuite été progressivement entravé par une lente revégétalisation.

Le bassin de la Touloubre (400 km^2) se trouve au nord du bassin de l'Arc (Fig. 2). Son substrat est essentiellement constitué par des calcaires du Crétacé inférieur et de l'Oligocène et par de la molasse miocène ; des argiles et des marnes de l'Oligocène et du Miocène affleurent localement. Le relief est peu accusé : 80 % de la superficie du bassin sont compris entre 40 et 300 m d'altitude, et les points culminants atteignent 400 à 500 m. La couverture végétale est composée pour moitié de cultures (prairies, labours, vignes et vergers) et pour moitié de pinèdes et de garrigue.

Le bassin de la Cadière, dont la superficie est de 73 km^2, est situé au sud-ouest du bassin de l'Arc (Fig. 2). Il s'inscrit entre le front de cuesta de la Chaîne de Vitrolles (271 m) à l'est et la Chaîne de la Nerthe (272 m) au sud. Ces reliefs, constitués de calcaires du Jurassique supérieur à l'Éocène, présentent des versants assez fortement inclinés (pentes de 5 à 10°). Ils sont recouverts de pins d'Alep et d'une garrigue qui peut être localement très clairsemée. La plaine alluviale est façonnée dans les argiles et les marnes du Crétacé supérieur et de l'Éocène, largement recouvertes par les colluvions würmiennes. Ce bassin est caractérisé par la présence importante de l'urbanisation qui occupe actuellement plus de 25 % de la superficie et par une densité de population de 1 450 habitants/km^2.

Ces trois bassins sont soumis à un climat de type méditerranéen présentant des précipitations irrégulières, marquées par une abondance en automne et par une période sèche en été. Selon les données fournies par Météo France, de 1961 à 2000, les précipitations annuelles moyennes ont atteint 616 mm au cœur du terrain d'étude (station d'Aix-Galice). Toutefois les précipitations augmentent globalement 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 (Fig. 3). Les pluies peuvent être très intenses : 77 mm en une heure le 7 septembre 1998 sur le bassin de la Cadière ; 130 mm en une heure le 22 septembre 1993 sur celui de l'Arc (pluies horaires mesurées par Météo-France).

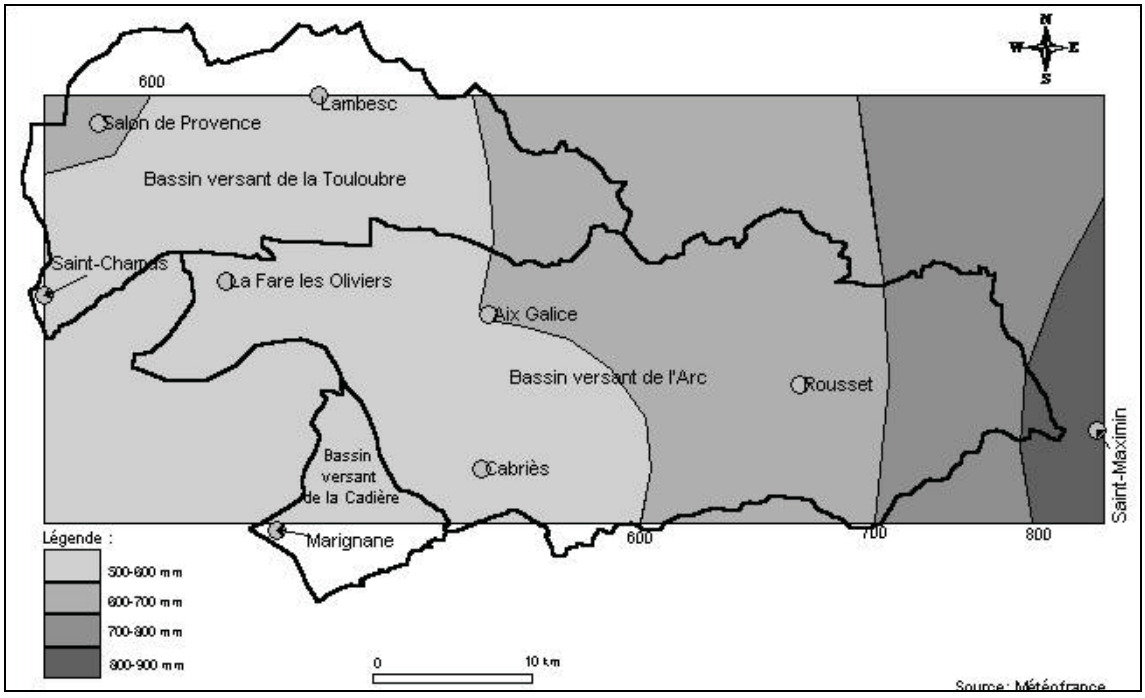

Figure 3 - Précipitations annuelles moyennes (1973 à 1999) sur le bassin versant de l'Étang de Berre.

Les débits spécifiques annuels moyens sont de 4,5 l/s/km^2 pour l'Arc, de 8,2 l/s/km^2 pour la Touloubre et de 11,6 l/s/km^2 pour la Cadière. Sous la dépendance des conditions pluviométriques, l'Arc et la Cadière sont soumis à un régime hydrologique marqué par une période d'abondance en hiver et de basses eaux en été. Le régime de la Touloubre, quant à lui, est influencé par les rejets des canaux d'irrigation alimentés par les eaux de la Durance. Il connaît une longue période d'abondance hydrologique du printemps à l'automne et une courte période de basses eaux en hiver. À l'échelle journalière, les trois cours d'eau sont soumis à des crues particulièrement fortes en automne et en hiver, en relation avec des précipitations à caractère orageux. Les débits journaliers spécifiques ont atteint 372 l/s/km^2 pour l'Arc en janvier 1978, 308 l/s/km^2 pour la Cadière en septembre 1993 et 68 l/s/km^2 pour la Touloubre en février 1994.

III - LES PRÉCIPITATIONS : FACTEUR PRINCIPAL DE L'ÉROSION HYDRIQUE

Les travaux menés par É. ROOSE (1981) sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, montrent que,

dans une région connaissant partout le même régime pluviométrique, il existe une relation simple entre l'indice d'agressivité climatique annuel moyen (Ram) de W.H. WISCHMEIER (1959) et les précipitations annuelles moyennes (Pam) : Ram = coefficient × Pam.

En appliquant aux valeurs annuelles moyennes des précipitations Pam (Fig. 3), un coefficient de 0,39 trouvé pour le Midi méditerranéen (J. PIHAN, 1979), il est possible d'évaluer l'indice d'agressivité climatique annuel moyen Ram sur le bassin de l'Étang. Sur la période 1973-1999, les valeurs annuelles moyennes de l'indice sont comprises entre 210 et 337 (M. FIANDINO, 2003). En relation avec l'abondance des précipitations, cet indice manifeste, bien évidemment, un gradient croissant d'ouest en est.

IV - LA SENSIBILITÉ POTENTIELLE DES TERRAINS À L'ÉROSION

1) Méthodologie

Déterminer les terrains potentiellement les plus exposés aux problèmes d'érosion mécanique relève de la prévision des risques. Pour cela, nous prenons en compte quatre facteurs de l'érosion qui déterminent les effets des précipitations : la topographie, la lithologie, la pédologie et l'occupation du sol (W.H. WISCHMEIER et D.D. SMITH,, 1969 ; Y. LE BISSONNAIS *et al.,* 2002).

Afin de réaliser une cartographie des zones sensibles à l'érosion pour chaque bassin versant, nous utilisons le logiciel MapInfo comme outil de cartographie et d'analyse spatiale. MapInfo permet, de superposer différentes couches d'information (fond de plan scanné : résolution de 10 m, topographie, lithologie, pédologie, occupation du sol, hydrographie, …) pour chaque bassin versant, et de restituer une cartographie synthétique représentant les zones sensibles à l'érosion mécanique. L'étude des zones potentiellement érodables se fait en trois étapes :

- Dans un premier temps, nous recueillons les informations disponibles qui nous permettent de constituer une base de données, chaque couche d'information géographique correspondant à un facteur de l'érosion.
- Ensuite, les paramètres de chaque couche d'information obtenue (cartes des pentes, de la lithologie, de la pédologie et de l'occupation du sol) subissent une classification pour extraire des degrés de sensibilité potentielle à l'érosion (voir détails de la méthode dans les sous-chapitres suivants). Quatre cartes de sensibilité potentielle, correspondant aux quatre facteurs considérés, ont donc été réalisées pour chaque bassin versant (M. FIANDINO, 2003). Pour chacun de ces documents cartographiques, qui ne seront pas présentés ici, les seuils de sensibilité ont été choisis à la lumière de données bibliographiques, mettant en évidence, en particulier, les phénomènes érosifs en milieu méditerranéens (G. CLAUZON et J. VAUDOUR, 1971 ; C. MARTIN, 1989 ; J.M. VIGUIER, 1993 ; M. VOLTZ *et al.,* 1998 ; F.E. PETIT *et al*., 1987). Les données extraites de travaux de spécialistes en érosion ont été préférées à des mesures des phénomènes érosifs *in situ*, car la taille des bassins versants (73 à 720 km^2) et les moyens dont nous disposions ne permettaient pas de développer cette approche en complément de la quantification des transports en suspension menée à l'exutoire des bassins versants (M. FIANDINO et C. MARTIN, 2004).
- Enfin, nous déterminons une hiérarchisation des facteurs de l'érosion hydrique, afin d'effectuer un croisement entre les cartes thématiques de sensibilité sous forme de combinaisons logiques ; l'intensité du risque d'érosion potentielle est définie pour chacune des combinaisons. Ainsi, un premier croisement est fait entre la carte de sensibilité en fonction de l'occupation du sol et celle en fonction des pentes. Au résultat de ce premier croisement, nous superposons la carte de sensibilité des sols, puis celle de sensibilité des roches (M. FIANDINO, 2003). Pour chaque bassin versant, est alors dressée une carte de sensibilité potentielle à l'érosion (Fig. 4). La validation des résultats nécessite des reconnaissances de terrain.

2) La base de données

Le modèle numérique de terrain (MNT), fourni par l'Institut Géographique National, s'appuie sur une matrice de points référencés en x, y et z (avec un espacement de 100 m entre les points). Une carte des pentes a été extraite de ce MNT avec le logiciel surfer. Différentes classes de pentes ont été choisies en fonction de leur représentativité sur le bassin et d'informations recueillies dans la littérature scientifique (G. CLAUZON et J. VAUDOUR, 1971 ; C. MARTIN et J. LAVABRE, 2000 ; J.M. VIGUIER, 1993). Au total, 12 classes de pentes ont été déterminées. Les 6 premières classes, de 0 à 5°,

permettent de distinguer les pentes dans les zones de cultures, sachant qu'une petite augmentation locale de pente peut être à l'origine d'une érosion plus forte. Les classes supérieures à 30° correspondent aux zones de relief.

Les connaissances sur la lithologie sont tirées des six cartes géologiques au 1/50000 qui couvrent le terrain d'étude. Le type de substrat est généralement pris en compte à travers ses relations avec les sols et les formations superficielles dont le rôle est prépondérant.

Nous disposons de 14 cartons pédologiques dressés par la Société du Canal de Provence sur quelques secteurs localisés (plaines agricoles et zones potentiellement agricoles) et des fiches pédologiques de l'Atlas des sols de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (G. DUCLOS, 1994), lesquelles fournissent des informations détaillées, mais très ponctuelles. Ces documents étant très hétérogènes, seuls quatre critères pédologiques ont été utilisables : la texture, la pierrosité, la profondeur et le pourcentage de matière organique. Ces informations ne permettaient pas de réaliser une véritable carte des sols. L'objectif s'est donc réduit à décrire succinctement les principaux types de sol (M. FIANDINO, 2003).

Nous avons utilisé la version CLV 1990 de la base de données Corine Land Cover, produite par l'Institut Français de l'Environnement. Bien qu'ils aient été publiés en 1996, les documents portant sur le secteur d'étude présentent l'occupation du sol en 1987-1988. Ils ne tiennent donc pas compte des évolutions récentes du couvert végétal, en particulier pour les zones incendiées en août 1989 et 1995 et en juillet 1997 (soit 11300 ha de végétation détruite par ces trois incendies). L'observation de photographies aériennes et d'images satellitaires (1992 à 1998), ainsi que des reconnaissances de terrain, ont permis de prendre en compte ces modifications et de les intégrer dans la carte de sensibilité en fonction de l'occupation du sol.

3) Classification de l'érodibilité en fonction des facteurs de l'érosion

Pour chaque couche d'information, des paramètres en relation avec l'érosion mécanique déterminent des niveaux croissants de sensibilité des sols à l'érosion. Pour chaque facteur de l'érosion, est alors réalisée une carte de sensibilité à l'érosion potentielle (M. FIANDINO, 2003).

Pour la carte de sensibilité potentielle des versants à l'érosion mécanique en fonction de l'inclinaison de la pente, nous avons distingué cinq classes de sensibilité :
- Sensibilité très réduite : pentes de 0 à 0,5°.
- Sensibilité réduite : pentes de 0,5 à 2,5°.
- Sensibilité moyenne : pentes de 2,5 à 5°.
- Grande sensibilité : pentes de 5 à 15°.
- Très grande sensibilité : pentes supérieures à 15°.

Les seuils de sensibilité ont été choisis à la lumière des données bibliographiques sur l'érosion de parcelles expérimentales en milieu méditerranéen (voir *supra*). La répartition des classes de pente n'est pas la même pour les trois bassins. Le bassin de la Touloubre est caractérisé par un faible pourcentage des pentes les plus fortes (16,5 % du bassin versant), alors que pour les bassins de l'Arc et de la Cadière, les pourcentages sont respectivement de 38,1 % et de 37,7 %.

Quatre classes de sensibilité à l'érosion ont été retenues en fonction de la lithologie :
- Très grande sensibilité : alluvions récentes et anciennes, Quaternaire indifférencié, éboulis, argiles et marnes, limons, conglomérats.
- Grande sensibilité : marno-calcaires et brèches, calcaires argileux, intercalations de molasse, de sables et de marnes, intercalations de calcaires et d'argiles .
- Sensibilité réduite : intercalations de calcaires et grès, calcaires marneux, calcaires lacustres, molasse, dolomie, intercalations de calcaires et de calcaires argileux, intercalations de calcaires, de grès et d'argiles, intercalations de calcaires et de marnes .
- Sensibilité très réduite : calcaires massifs.

Les critères de classification sont la dureté et la cohésion des roches, la structure, et l'épaisseur des strates. Les informations trouvées dans les notices des cartes géologiques ont été complétées par des observations sur le terrain. D'après ces classes de sensibilité, le bassin de l'Arc présente une plus grande sensibilité à l'érosion (65,5 % du bassin sont occupés par des substrats sensibles à très sensibles) que les deux autres bassins (Touloubre : 43 % ; Cadière : 45 %). Mais la sensibilité lithologique n'a bien sûr de sens que si le substrat est affleurant. Dans la majorité des cas, celui-ci est recouvert d'un sol ou de formations superficielles.

L'Atlas des Sols de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur (G. DUCLOS, 1994) et les cartes pédologiques dressées par la Société du Canal de Provence ont fourni la trame d'une

cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion fondée sur la profondeur, la texture, la pierrosité et le pourcentage de matière organique. Nous avons extrapolé à l'ensemble du terrain d'étude les informations fournies par ces documents, en nous appuyant sur les observations de profils que nous avons pu faire sur le terrain, sur la nature du substrat (les calcaires bruts donnant en principe des sols squelettiques et très caillouteux, par exemple) et sur l'occupation du sol (certaines cultures ayant besoin d'une épaisseur de sol plus ou moins profonde). À partir de ces informations, nous avons distingué trois grands types de sols plus ou moins sensibles à l'érosion :

- Sols très sensibles : profonds à moyennement profonds (1 à 2 m), texture fine (sablo-limoneuse, limoneuse, limono-argileuse), faible pourcentage de cailloux (maximum 10 à 30 %).
- Sols moyennement sensibles : moins profonds (0,5 à 1 m), texture plus grossière, pourcentage de cailloux plus élevé (30 à 50 %).
- Sols peu sensibles : faible profondeur (inférieure à 0,5 m), texture grossière, pourcentage de cailloux élevé (50 % et plus).

Le bassin de la Cadière présente une forte extension des sols les plus sensibles à l'érosion (54,5 % du bassin versant), devant le bassin de l'Arc (37,5 %) et celui de la Touloubre (24,7 %).

À partir de la carte de l'occupation du sol, cinq classes de sensibilité ont été prises en compte :

- Très grande sensibilité : zones de cultures permanentes, terres arables et zones incendiées (le couvert végétal naturel a été éliminé, soit par les activités humaines, soit par le feu).
- Grande sensibilité : zones agricoles hétérogènes, zone de végétation naturelle clairsemée (cette classe correspondant à un couvert végétal peu dense).
- Sensibilité réduite : forêts, couverts arbustifs, prairies, pelouses et landes naturelles, végétation sclérophylle (cette classe correspondant à un taux élevé de recouvrement des sols par la végétation).
- Sensibilité très réduite : tissu urbain et espaces associés, roches nues.
- Hors classe : plans d'eau et marais.

Du point de vue de l'occupation du sol, le bassin de la Cadière, très urbanisé, est moins sensible (27,5 % seulement du bassin sont occupés par des types d'occupation du sol d'une grande et d'une très grande sensibilité) que les deux autres bassins (Arc : 46,2 % et Touloubre : 45,4 %) dans lesquels l'agriculture est très présente.

V - CARTOGRAPHIE DES ZONES SENSIBLES À L'ÉROSION HYDRIQUE

La combinaison des couches d'information permet de définir la sensibilité à l'érosion. Dans les trois bassins étudiés, 45 à 70 % des surfaces sont sensibles ou très sensibles à l'érosion hydrique (Tab. I et Fig. 4) : les zones agricoles, quels que soient la pente et le type de sol ; les zones incendiées encore peu revégétalisées, en particulier sur pente forte, surtout si les sols sont profonds et peu caillouteux ; les zones très pentues et sur substrat très fragile, sur lesquelles des rigoles, voire des petites ravines, se forment très rapidement (en quelques heures lors de pluies intenses) et où la végétation ne peut pas s'installer ; les zones de végétation naturelle peu dense, sur pente moyenne à forte et sur sol profond à moyennement profond et peu caillouteux. Ces zones fournissent surtout des éléments fins comme de l'argile, des limons, des sables et quelques éléments de taille plus importante comme des graviers. Les zones à sensibilité réduite ou très réduite occupent de 30 à 55 % des bassins. Les zones à sensibilité réduite correspondent aux zones de végétation naturelle très couvrante, de type pinède, chênaie ou garrigue, quelle que soit la pente, et sur sol peu profond et caillouteux. En effet, les ravines y sont pratiquement inexistantes. Les zones à sensibilité très réduite correspondent soit au tissu urbain dense et aux espaces associés, soit aux zones où le substrat calcaire est affleurant et les sols squelettiques.

Tableau I - Part des classes de sensibilité pour chaque bassin versant.

	Très grande sensibilité	Grande sensibilité	Sensibilité réduite	Sensibilité très réduite
Arc	39,6 %	29,0 %	22,4 %	9,0 %
Touloubre	24,5 %	20,1 %	49,7 %	5,7 %
Cadière	37,6 %	22,3 %	18,1 %	22,0 %

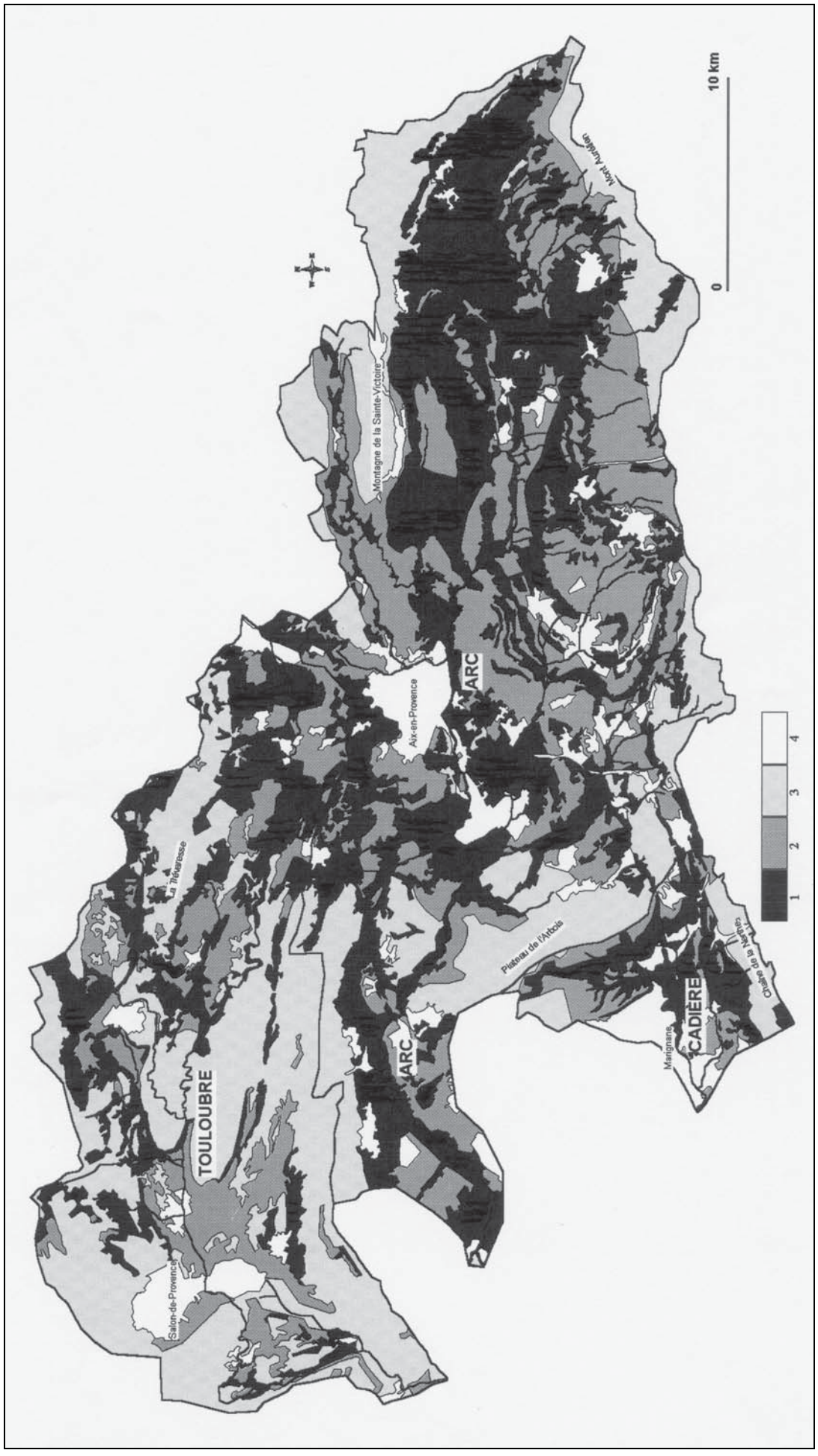

Figure 4 - Zones sensibles à l'érosion hydrique dans les trois bassins.
1 : Très grande sensibilité ; 2 : Sensibilité moyenne ;
3 : Sensibilité réduite ; 4 : Sensibilité très réduite.

Pour chaque bassin, la carte de sensibilité à l'érosion est en accord avec la localisation et l'intensité des manifestations érosives dans le paysage :

- Dans le bassin de l'Arc, de profondes ravines ont été réactivées au pied de la Sainte-Victoire après l'incendie d'août 1989. En dépit de la modestie des pentes, le vignoble du centre du bassin est affecté de rigoles ; les versants (en pente plus ou moins forte et aux sols caillouteux) recouverts de garrigue et de pinède manifestent une relative stabilité.
- Dans le bassin de la Touloubre, de petites rigoles apparaissent dans les parcelles de vigne en pente faible ; les secteurs peu affectés par l'érosion hydrique correspondent aux collines couvertes par la pinède et la garrigue et aux sols peu épais, et à la plaine aval occupée par des prairies.
- Dans le bassin de la Cadière, des ravines incisent le piémont pentu de la Chaîne de Vitrolles. La plaine agricole, pourtant peu pentue et très morcelée, est soumise à une forte érosion (formation de rigoles). Le versant nord de la Nerthe, où les sols squelettiques et caillouteux sont bien protégés par la pinède et la garrigue, se rattache aux secteurs stables.

VI - TRANSFERT DU MATÉRIEL DANS LES RÉSEAUX DE DRAINAGE ÉLÉMENTAIRES

Depuis une trentaine d'années, l'évolution de l'occupation du sol est marquée par une régression de la mise en valeur des sols et une densification de la végétation naturelle et de la ripisylve, ce qui contribue à une diminution de l'activité érosive sur les versants, à l'engorgement détritique dans la partie amont des thalwegs et à une diminution des apports fins dans la basse vallée (M. JORDA et M. PROVANSAL, 1990 ; M. FIANDINO, 1996). Cette évolution se manifeste donc par une relative déconnexion entre les versants et les cours d'eau principaux.

L'étude spatiale des réseaux de drainage élémentaires des bassins versants de l'Arc, de la Touloubre et de la Cadière permet d'appréhender leur capacité à évacuer les matériaux provenant des versants (Fig. 5). Pour cela, une typologie des drains a été réalisée en croisant différents paramètres bio-géomorphologiques : densité de la ripisylve, pente longitudinale, densité des fossés, nature du matériel sédimentaire dans le fond des lits, présence ou non de colmatage, occupation du sol. Cette approche a été complétée par des séries de prélèvements d'eau dans les drains en période de crue (M. FIANDINO, 2003), afin de comparer les réponses sédimentaires des sous-bassins avec la carte de sensibilité des versants à l'érosion hydrique.

Sur les bassins de l'Arc et de la Cadière, se trouvent de vastes zones, agricoles et naturelles, caractérisées par un couvert végétal peu dense. Les drains élémentaires présentent une forte pente longitudinale et une ripisylve réduite. Ils ont un rôle actif à la fois dans le transfert des matériaux livrés par les versants et dans la production d'éléments par érosion de leurs berges. Les concentrations des matières en suspension mesurées ont varié de 2 à 2,5 g/l, pour des pluies de l'ordre de 62 mm en 14 heures, sur le haut bassin de l'Arc.

En bordure des champs, des routes et des chemins, de nombreux fossés bien entretenus évacuent facilement les éléments les plus fins arrachés aux parcelles agricoles lors des pluies. Toutefois la nécessité de curer régulièrement ces fossés, engorgés localement de graviers, de sables et parfois même de limons, témoigne de l'apport régulier de matériaux et de leur capacité réduite à évacuer le matériel, en particulier pour la Touloubre. Dans ces fossés, les concentrations des MES ont été comprises entre 0,5 et 3,5 g/l, pour des intensités des pluies de 21 à 45 mm en 2 heures, sur l'ensemble des trois bassins.

Dans d'autres zones agricoles, de petits fossés en pente faible et envahis par la végétation sont favorables aux phénomènes d'engorgement. Dans le fond de leur lit, se dépose du matériel sédimentaire de taille variée. Ce type de fossés se situe surtout sur le bassin de la Touloubre.

Dans les zones de garrigue ou de pinède, certains thalwegs, dont le fonctionnement est limité aux périodes de pluie, sont envahis par une ripisylve dense. Ils collectent des eaux de ruissellement peu chargées en éléments fins (concentrations des MES entre 0,1 et 0,3 g/l). Ce type de thalweg se rencontre sur les trois bassins.

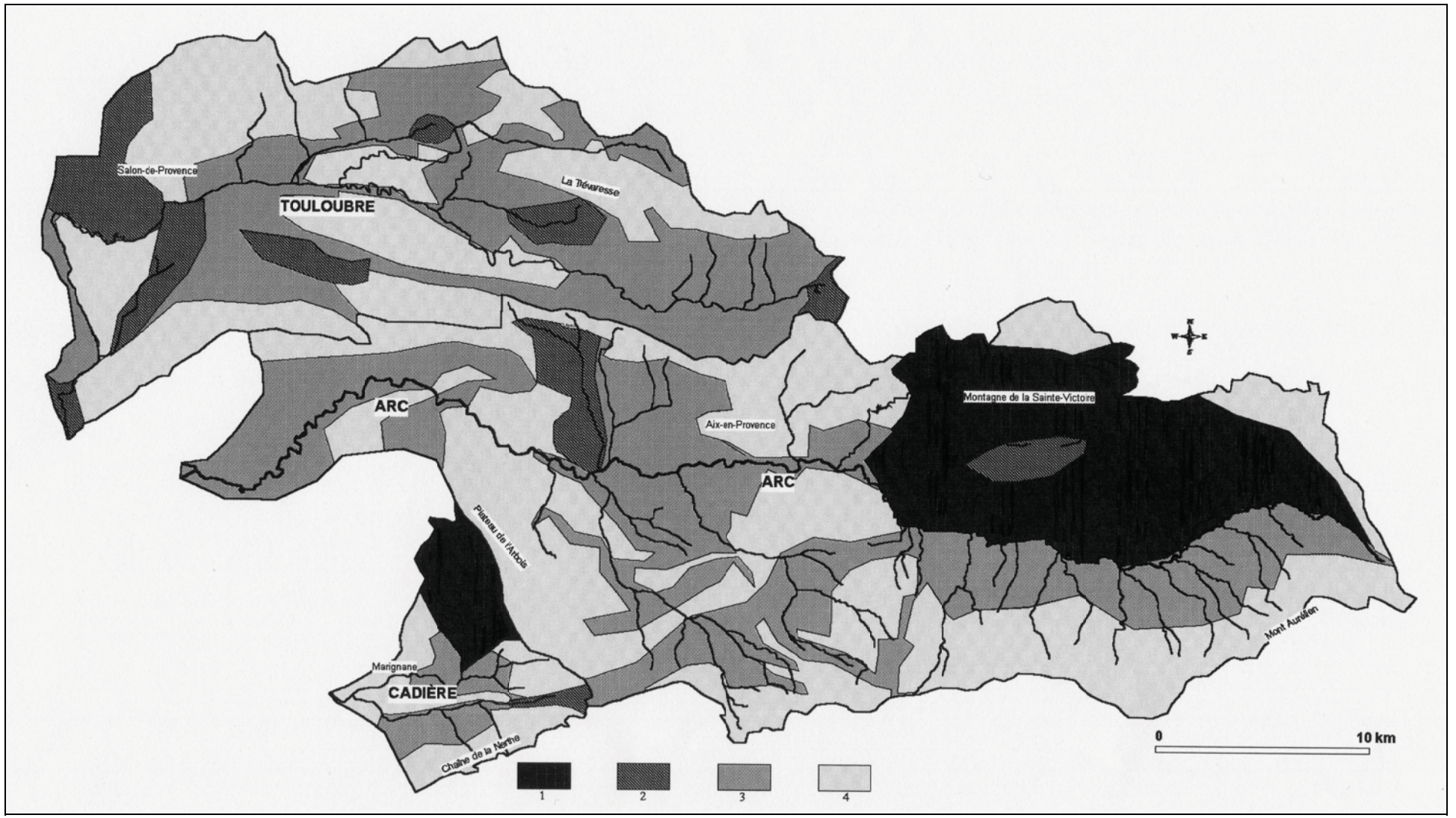

Figure 5 - Fonctionnement des drains élémentaires dans les trois bassins.

1 : Transfert des sédiments venant des versants et des berges ; 2 : Accumulation des sédiments ;
3 : Transfert de MES ; 4 : Collecte des eaux de ruissellement peu chargées.

Ainsi les fortes concentrations de MES s'observent aussi bien dans les réseaux fluviaux élémentaires drainant les zones agricoles que dans les zones de végétation peu dense, certains évacuant aisément les matériaux, alors que d'autres montrent une certaine déconnexion avec les cours d'eau principaux qui se traduit par l'engorgement du fond de leur lit. Les plus faibles concentrations des MES se trouvent dans les réseaux élémentaires drainant des zones de végétation dense, aux sols caillouteux, voire squelettiques.

Cette approche des réseaux fluviaux élémentaires permet d'obtenir une première confirmation de la cartographie des zones potentiellement productrices de matériaux sur les versants. Des nuances sont à apporter en fonction de la localisation et de l'intensité des pluies qui engendrent des différences de réponses hydro-sédimentaires.

VII - CONCLUSION

Les bassins de l'Arc et de la Cadière regroupent les conditions les plus favorables à l'érosion hydrique. Le matériel détritique susceptible d'être mobilisé est fin, les débits liquides peuvent être importants et les drains ont une bonne capacité d'évacuation des matériaux. Dans le bassin de la Touloubre, les conditions sont moins favorables à l'érosion avec des pentes moins fortes et des roches moins fragiles. Les zones susceptibles de fournir des matériaux sont compartimentées et parfois sans réelle jonction avec le cours d'eau principal. Les fossés ont plutôt tendance à stocker les matériaux arrachés aux versants. Le tableau II synthétise les caractères des trois bassins, à la fois du point de vue de la sensibilité des versants à l'érosion hydrique et de la capacité des drains à transférer les matériaux.

Tableau II - Fonctionnement hydrosédimentaire des bassins versants.

	Agressivité climatique	Facteurs favorables à l'érodabilité			Facteurs favorables au transfert			Synthèse
		Pentes	Substrat et sols	Occupation du sol	Forme du bassin	Pente des fossés	Ripisylve	
Arc	++	++	++	+++	-	+	+	+++
Touloubre	+	-	+	++	-	-	-	+
Cadière	-	++	++	+++	+	+	++	+++
- à +++ : conditions croissantes pour l'érodabilité et le transfert.								

Les résultats de l'approche cartographique ont été confrontés à une quantification des transports de MES dans les principaux cours d'eau (M. FIANDINO, 2003), l'Arc, la Touloubre et la Cadière. De septembre 1998 à décembre 2000 pour la Touloubre et la Cadière, et de janvier 1999 à décembre 2000 pour l'Arc, de nombreuses campagnes de prélèvements d'eau ont été effectuées en période de crue et en basses eaux. Ces données ont permis de calculer des flux de matières en suspension sur la période de mesure et de les évaluer sur une période plus étendue (1961-2000) (M. FIANDINO, 2003 ; M. FIANDINO et C. MARTIN, 2004). Sur la période commune de calcul des flux utilisant les données hydrologiques (de 1998 à 2000), l'érosion spécifique moyenne s'élève à 36,2 t/km^2/an pour l'Arc, 16,8 t/km^2/an pour la Touloubre et 56,9 t/km^2/an pour la Cadière. L'érosion sur les versants représente 98 % au moins des transports de MES pour la Touloubre et la Cadière, et 84 % pour l'Arc, où l'érosion des berges est active. Sur la période 1961-2000, les taux d'érosion spécifiques annuels moyens atteignent 35,5 t/km^2 pour l'Arc, 17,4 t/km^2 pour la Touloubre et 47,7 t/km^2 pour la Cadière. Ces valeurs sont représentatives à la fois des conditions pluviométriques pendant la période étendue 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). Ainsi l'approche cartographique utilisée, si elle n'a pas pour objectif une prédiction des risques d'érosion, en utilisant une équation du type de celle de WISCHMEIER (M. TAHRI *et al.*, 1993 ; B. TOUAÏBA et M. ACHITE, 2003), n'en est pas moins appuyée sur des mesures des transports solides et sur des valeurs extrapolées à partir de ces mesures. La cartographie des zones potentiellement érodables

et la quantification des flux de MES dans les cours d'eau apparaissent donc complémentaires.

En terme de dégradation spécifique, ces trois cours d'eau se placent en position moyenne par rapport aux fleuves et rivières français (Tab. III). Toutefois les valeurs obtenues sont sans commune mesure avec ce que l'on peut observer dans d'autres secteurs du pourtour méditerranéen (jusqu'à 1670 t/km²/an, dans le cas de l'oued Nekkor au Maroc – T. MARZOUKI, 1992).

Tableau III - Comparaison des flux sédimentaires des cours d'eau étudiés et de quelques cours d'eau français et du pourtour méditerranéen.

	Fleuve	Surface du bassin versant (km^2)	Flux de MES (t/an)	Érosion spécifique ($t/km^2/an$)
Bassin de l'Étang de Berre	Arc (*) Touloubre (*) Cadière (*)	650 386 72,4	23 100 6 720 3 450	35,5 17,4 47,7
France	Rhône (1) Durance (2)	90 000 11 000	$2 à 8 \times 10^6$ $4,2 \times 10^6$	22,2 à 88,8 364
Pourtour Méditerranéen	Inaouène (Maroc) (3) *Barrage Idris1er* Nekkor (Maroc) (4) *Barrage Khattabi*	3 322 780	$3,3 \times 10^6$ $1,31 \times 10^6$	1 131 1 673
Sources : * : cette étude ; 1 : J.C. RODITIS et D. PONT, 1993 ; 2 : C. ALARY, 1998 ; 3 : H. SIBARI *et al.*, 2001 ; 4 : T. MARZOUKI, 1992.				

Remerciements **:** Les recherches ont bénéficié du soutien de l'ANRT, de la Société Safege-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 Provence-Alpes-Côte d'Azur, de la Direction Régionale de l'Environnement (qui a fourni les données hydrométriques), des Services Maritimes et du GIP pour la réhabilitation de l'Étang de Berre. Nous sommes reconnaissante à la Société du Canal de Provence d'avoir mis à notre disposition différentes études pédologiques réalisées par ses services.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALARY C. (1998) - *Mécanismes et bilans d'érosion dans un bassin versant méditerranéen aménagé : le cas de la Durance (S-E France).* Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille II, 276 p. et annexes.

BALLAIS J.L. (1993) - L'érosion consécutive à l'incendie d'août 1989 sur la montagne Sainte-Victoire : trois années d'observations (1989-1992). *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, n° 5, p. 423-437.

BRGM - Cartes géologiques au 1/50 000 Martigues-Marseille (1963), Salon-de-Provence (1968), Aix-en-Provence (1969), Pertuis (1970), Eyguières (1975), Brignoles (1979).

CLAUZON G. et VAUDOUR J. (1971) - Ruissellement, transports solides et transports en solution sur un versant aux environs d'Aix-en-Provence. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, vol. XIII, n° 5, p. 489-504.

CORBONNOIS J. (1998) - Les facteurs de la variation spatio-temporelle des transports solides et dissous. *Géomorphologie*, n° 4, p. 313-329.

DUCLOS G. (1994) - *Atlas des sols de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.* Édit. Société du Canal de Provence, 955 p.

FIANDINO M. (1996) - *Formation et transit de la charge solide sur deux petits cours d'eau méditerranéens, dans le haut bassin du Calavon (Alpes de Haute Provence).* Mémoire de DEA de Géographie physique, Université d'Aix-Marseille I, 145 p.

FIANDINO M. (2003) - *Apports de matières en suspension par les fleuves côtiers à l'Étang de Berre (Bouches-du-Rhône, France) : quan-*

tification des flux, identification des zones sources, étude des relations avec les conditions hydrologiques. Thèse de doctorat, Université de Provence, 326 p.

FIANDINO M. et MARTIN C. (2004) - Flux de matières en suspension des fleuves côtiers se jetant dans l'Étang de Berre (Bouches-du-Rhône, France). *La Houille Blanche*, n° 4, p. 97-101.

Institut Français de l'Environnement (1996) - *Base de données Corine Land Cover*. Site internet : www.ifen.fr .

JORDA M. et PROVANSAL M. (1990) - Terrasses de culture et bilan érosif en région méditerranéenne : le bassin versant du Vallat de Monsieur (Basse Provence). *Méditerranée*, n° 3-4, p. 55-62.

LE BISSONNAIS Y., THORETTE J., BARDET C. et DAROUSSIN J. (2002) - *L'érosion hydrique des sols en France*. Édit. INRA-IFEN, 108 p.

MARTIN C. (1989) - Dégradation d'un sol défriché sur gneiss à la station Lambert (Massif des Maures, Var). *Revue de Géomorphologie Dynamique,* t. XXXVIII, n° 1, p. 17-29.

MARTIN C. et LAVABRE J., sous la direction de (2000) - *Conséquences d'un incendie de forêt dans le bassin versant du Rimbaud (Massif des Maures, Var, France)*. Collection Études : Gestion des milieux aquatiques, n° 16, Cemagref Éditions, 170 p.

MARZOUKI T. (1992) - Diagnostic de l'envasement des grands barrages marocains. *Revue Marocaine de Génie Civil*, vol. 38, p. 46-50.

PETIT F.E., COSANDEY C. et MUXART T. (1987) - Défrichements de terres agricoles et risque érosif, un exemple dans le sud du Massif Central français. *Bulletin de la Société Languedocienne de Géographie*, n° spécial des Études Vauclusiennes, vol. 21, n° 3-4, p. 219-227.

PIHAN J. (1979) - Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France. *Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen* (Strasbourg, 1978), p. 13-18.

RODITIS J.C. et PONT D. (1993) - Dynamiques fluviales et milieux de sédimentation du Rhône à l'amont immédiat de son delta. *Méditerranée*, n° 3-4, p. 5-18.

ROOSE É. (1981) - *Dynamique actuelle de sols ferralitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale.* Travaux et documents de l'ORSTOM, 569 p.

ROOSE É., DE NONI G. et LAMACHÈRE J.M. (1998) - L'érosion : 40 ans de recherches multidisciplinaires. *ORSTOM Actualités*, n° 56, p. 2-9.

SIBARI H., HAIDI S. et 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.

TAHRI M., MERZOUK A., LAMB H.F. et MAXTED R.W. (1993) - Étude de l'érosion hydrique dans le plateau d'Imelchil dans le Haut Atlas central. Utilisation d'un SIG. *Géo Observateur*, n° 3, p. 51-60.

TOUAÏBA B. et ACHITE M. (2003) - Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 48, n° 2, p. 235-242.

VIGUIER J.M. (1993) - *Mesure et modélisation de l'érosion pluviale. Application au vignoble de Vidauban (Var)*. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille II, 335 p.

VOLTZ M., ANDRIEUX P., BOUZIGUES R., LENNARTZ B., LOUCHART X., MOUSSA R. et RIBOLZI O. (1998) - Transport of water and matter in a farmed sedimentary soil system in the mediterranean environment. *16e Congrès Mondial de Science du Sol* (Montpellier, 1998), 6 p.

WISCHMEIER W.H. (1959) - A rainfall erosion index for an universal soil-loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 23, n° 8, p. 246-249.

WISCHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1969) - An universal soil-loss estimating equation to guide conservation soil farming. *7th International Congress of Soil Science*, I, p. 418-425.