

DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE D'UN COURS D'EAU DE MONTAGNE COURT-CIRCUITÉ : LA HAUTE VALLÉE DE L'AUDE À L'AVAL DU BARRAGE DE PUYVALADOR (FRANCE)

Laurent ASTRADE, Nicolas JACOB, Jean-Paul BRAVARD, Caroline ALVAREZ

Résumé

Les tronçons de rivières à l'aval des barrages sont des milieux illustrant les impacts anthropiques sur les cours d'eau. Leur dynamique est basée sur un débit réservé constant et sur des contrastes considérables avec les hauts débits qui correspondent aux crues majeures que les barrages ne peuvent contenir. La morphologie et l'écologie de ces milieux évoluent le plus souvent de façon importante après l'installation des ouvrages.

Depuis le début du siècle, la Haute Vallée de l'Aude est fortement marquée par l'hydroélectricité. La problématique actuelle est la gestion de la ressource énergétique dans le contexte de préoccupations croissantes concernant la préservation des écosystèmes aquatiques. Des études récentes mettent en avant le fait que la faible densité des frayères et la faible biomasse en truites seraient dues à la réduction des surfaces en gravier disponibles pour la reproduction, le lit souffrant d'un ensablement important attribué au régime hydrologique artificialisé de l'Aude.

La quantification de la présence du sable dans le lit mineur montre que la morphologie de l'Aude est anormalement affectée par l'ensablement, mais que, malgré l'altération de l'hydrologie par les barrages, l'Aude conserve la capacité d'expulser une partie des dépôts lors des hausses de débit. La mesure de la granulométrie et des concentrations en métaux lourds dans les sédiments fins, d'une part, et l'étude détaillée du bassin versant, d'autre part, permettent ensuite de préciser l'origine du sable. Les résultats montrent le rôle de l'évolution des différentes formes d'utilisation du sol. Un tournant semble avoir été pris à partir des années 1970-80, quand se sont superposées à la déprise agricole de nouvelles pratiques de gestion de l'espace.

Mots-clés

rivière court-circuitée, charge sédimentaire, bassin versant

Abstract

The dams downstream sections of river constitute environmental areas which give a good illustration of anthropical impacts on riverbeds. Their dynamic is based on a low regulated flow and on large contrasts with high discharges induced by major floods that reservoirs can't hold. After the introduction of installations, the morphological and ecological evolutions of those environments are most of the time important. Since the beginning of the century, the High Valley of the Aude river has been heavily marked by hydroelectricity.

Since the beginning of the century, the High Valley of the Aude river has been heavily marked by hydroelectricity. The present question is to control the energizing resource and preserve the aquatic ecosystems. Recent studies realized on this matter bring out the fact that the weak density of spawning grounds and the low biomass on trouts might result from the reduction of the gravelly surfaces, available for reproduction; the river bed enduring important silting up imputed to the artificialized hydrological condition of the Aude river

The analysis of the silt quantity in the low flow channel shows that the Aude river morphology is abnormally affected by silting up, but also, despite the hydrology deterioration by installations, the river keeps up a capacity to expel part of the deposits during highflows. The origin of silt is firstly determined by the measure of granulometry and the heavy metal concentration of fine sediments and secondly by the detailed study of the catchment area. Results points out the role of the evolution of the various watershed soil uses. In the years 1970-80, a change seems to have come about when new practices regarding space management superposed on the agricultural receding.

Key Words

bypassed river, sediment load, river basin

INTRODUCTION

Dans les régions de montagne, les aménagements hydroélectriques réalisés depuis la fin du XIX^e siècle ont eu pour premier objectif de détourner l'eau captée dans les torrents pour produire de l'énergie sous de hautes chutes, en dissociant le débit liquide et le transport sédimentaire; on parle de « court-circuitage » du réseau fluvial naturel. Les développements suivants ont cherché à artificialiser le régime hydrologique par la constitution de réserves d'eau en altitude, de sorte que le débit turbiné sous la chute est régularisé à la hausse et que le débit des tronçons de rivières court-circuités est réduit à un minimum dit « débit réservé ». Longtemps cantonnée à l'étude des seules répercussions hydrologiques de ces aménagements à dérivation (Edouard et Vivian, 1984; Vivian, 1986), la recherche française s'est ensuite orientée vers une vision plus globale de l'environnement fluvial en intégrant à la démarche les conséquences morphodynamiques et écologiques de l'artificialisation des écoulements. L'essentiel des travaux récents a porté sur la dynamique des lits en tresses ou de torrents court-circuités dans les vallées des Alpes du Nord à remblaiement post-glaciaire (Klingeman et al., 1994; Peiry et Vivian, 1994; Marnézy, 1999). Ces travaux analysent les conditions du transit de la charge de fond, de son stockage ou de sa fixation par la végétation ligneuse en fonction des débits résiduels, en fonction des apports d'eau et de sédiments par les organismes affluents des tronçons court-circuités et en fonction des modalités de la gestion des ouvrages hydroélectriques. Cette problématique a été adaptée au cas des Pyrénées ariégeoises elles aussi fortement affectées par les aménagements hydroélectriques (Mercier, 1999).

Une des questions majeures posées par les aménagements hydroélectriques à dérivation est la possible injection de sédiments fins par les affluents à l'aval des ouvrages. Ils peuvent colmater les substrats caillouteux des tronçons court-circuités au détriment des faunes benthique et piscicole, de sorte qu'il est nécessaire de prévoir des lâchers d'eau pour le nettoyage des lits fluviaux (Milhous, 1982). La recherche qui a été réalisée dans la Haute Vallée de l'Aude s'inscrit dans cette orientation, mais elle présente l'intérêt de s'insérer dans un contexte morpho-sédimentaire original. Les gorges de l'Aude, court-circuitées dès 1899 par un aménagement hydroélectrique complexe, ont perdu la totalité de leur charge et une grande partie de leur matériel de fond grossier au profit exclusif de sables apportés par les affluents de l'Aude qui entaillent les versants d'un batholite granitique à couverture arénique épaisse. Les dépôts sableux superposent une néo-micromorphologie instable à une morphologie torrentielle héritée et inactive, ce qui induit des conséquences néfastes pour la faune piscicole dominée par des peuplements de truites. La question de l'origine, du dépôt et de la pérennité des dépôts sableux a justifié la réalisation de la présente étude (Bravard et al., 1999).

I. PRÉSENTATION

A. La Haute Vallée de l'Aude

Le bassin versant de la Haute Vallée de l'Aude occupe à l'amont d'Axat (392 m d'altitude) une superficie de 387 km². Il est composé du bassin du Capcir à l'amont, encadré à l'ouest par le massif du Carlit (2.810 m) et à l'est par le massif du Madrès (2.469 m), puis de gorges profondes incisées entre les dépressions du Donezan (Quérigut) et du Pays-de-Sault (Fig.1). La pente moyenne de l'Aude est de 0,035 m/m, mais trois tronçons se distinguent : le secteur du lac d'Aude en tête de bassin (0,1 m/m), le Capcir (0,015 m/m) et le secteur des gorges à l'aval de Puyvalador (0,03 m/m).

Dans les gorges, l'Aude traverse trois ensembles géologiques : des roches métamorphiques jusqu'à l'aval immédiat du barrage de Puyvalador, un batholite granitique composé de plusieurs auréoles de roches éruptives en disposition concentrique jusqu'à Usson, puis une série sédimentaire où dominent les calcaires, marqués par les effets de la dissolution karstique (Lagasque, 1984). Ce tronçon de 31 km, sur lequel porte cette étude, peut se partager aussi en différents secteurs de pentes, à savoir les six kilomètres à l'aval de la retenue de Puyvalador (0,025 m/m), les gorges du Carcanet (0,05 m/m) (Photo 1), les gorges de l'Aude (0,025 m/m) et les gorges de Saint-Georges (0,01 m/m).

Le climat de la région est un climat de type montagnard où l'influence méditerranéenne s'atténue progressivement d'est en ouest, laissant place à l'influence océanique. Le régime hydrologique de l'Aude dans sa haute vallée est de type nivo-pluvial, avec des minimums en été et en hiver, un maximum en mai et une légère remontée des débits en automne. Le débit annuel moyen est de l'ordre de 3 m³/s à Puyvalador et de 14,2 m³/s à l'aval du bassin (Cambon, 1994; DIREN, 1998 et 1999). Les deux principaux affluents sont la Bruyante et l'Aiguette qui présentent chacune un bassin de 87 km².

La Haute Vallée de l'Aude est fortement marquée par l'hydroélectricité depuis le début du siècle, (SIEE, 1992; Lentillon et al., 1996; GTHVA, 1998). L'installation du réseau est en grande partie l'oeuvre de Joachim Estrade, directeur de la Société Méridionale du Transport de Force (SMTF), la plus ancienne des sociétés françaises de distribution d'énergie électrique à haute tension, fondée en 1899. Les centrales de Saint-Georges (1901), de Gesse (1914) et d'Escouloubre (1921) constituent les premières installations de la SMTF.

L'aménagement prend véritablement forme en 1928 avec la mise en eau du réservoir de Puyvalador (8 hm³) en arrière d'un barrage-poids de 31 m de haut et de 170 m de long (Photo 2). Envisagée dès 1887 par le Service des Ponts et Chaussées, sa construction est lancée à la

Le réseau hydroélectrique de la Haute Vallée de l'Aude se présente donc aujourd'hui sous la forme de deux zones de stockage (Capcir, bassin de la Bruyante), d'une chaîne continue de barrages, de petits bassins et de centrales dans les gorges, desservis par un système de 14 prises d'eau et de 47,5 km de galeries d'amenée. Il est géré par deux groupements, ceux d'Usson et Nentilla, qui fonctionnent de façon indépendante. La puissance maximale de l'aménagement de la Haute vallée de l'Aude représente un total de 120.000 kW.

B. Problématique de gestion

Le bassin de la Haute Vallée de l'Aude rassemble de nombreuses activités liées à l'eau; les enjeux sont alors multiples et la gestion complexe entre des exigences variables, voire opposées (hydroélectricité, agriculture, tourisme, sports d'eau vive, pêche, exploitation de carrières proches du cours d'eau). Les deux retenues de Matemale et de Puyvalador et l'ensemble du réseau hydroélectrique jouent donc un rôle majeur dans la gestion des ressources en eau. Le fonctionnement des centrales hydroélectriques est réglé par la Convention de Matemale (1959) qui définit les conditions de mise à disposition par EDF d'un volume maximal de 10 hm³ pendant la période estivale, destiné au relèvement des étiages et aux prélèvements d'eau à usage agricole. D'autre part, les usines hydroélectriques sont soumises à la Loi Pêche (1984), qui fixe le débit réservé au quarantième du module interannuel pour les ouvrages existants et au dixième du module pour les nouveaux. Des études récentes ont fait le point sur les régimes hydrologiques propres aux différents tronçons du réseau hydrographique (Cambon, 1994; DIREN, 1998).

Dans ce contexte, l'une des problématiques actuelles de la Haute Vallée de l'Aude est la gestion de la ressource énergétique dans un contexte de sensibilisation croissante à l'égard des préoccupations concernant la qualité des milieux aquatiques. En effet, les suivis piscicoles réalisés par le conseil Supérieur de la Pêche ont mis en évidence une réduction de la surface des graviers et galets, qui est attribuée à un ensablement du lit de la rivière. L'ensablement des fonds est généralement considéré comme responsable d'une contraction des surfaces de frayères, d'une réduction de la chance de survie des oeufs et des larves ainsi que d'un appauvrissement de l'habitat pour les truites et leur proies; il est attribué au remblaiement des mouilles et, plus généralement, à l'homogénéisation de la morphologie à base de seuils et mouilles (Alexander et Hansen, 1986). Une étude géomorphologique et biologique de la Haute Vallée de l'Aude a alors été lancée par les organismes concernés (Electricité de France, Agence de l'Eau, Conseil Supérieur de la Pêche); c'est dans cette étude que s'est inséré ce travail sur la dynamique sédimentaire de la rivière à l'aval du barrage de Puyvalador.

C. Etat des connaissances sur la morphodynamique de la Haute Vallée

Les études réalisées depuis 1994 ont fait progresser la connaissance du fonctionnement morphodynamique de l'Aude. En premier lieu, l'étude du Conseil Supérieur de la Pêche (CSP) portant sur la vidange de Puyvalador (1995) a montré que le tronçon situé à l'amont de la Bruyante a un fonctionnement très particulier. Avant 1995, les gorges du Carcanet à l'amont des Bains d'Escouloubre ont connu un régime hydrologique très stable pendant au moins 20 ans, le barrage de Puyvalador n'ayant pas enregistré de déversement de crue; la construction du barrage de Matemale a, en effet, créé une importante réserve d'eau en tête du système. Les transects étudiés dans les gorges étaient alors caractérisés par le dépôt de vases riches en matière organique et par l'encombrement du lit par des embâcles puisque le débit de l'Aude était le débit réservé (0,075 à 0,150 m³/s), augmenté des apports des petits affluents coulant en milieu forestier. Une étude morphodynamique menée par le CSP (Saladin, 1994) a permis de caractériser les faciès aquatiques.

La vidange, réalisée du 26 au 28 juin 1995, avec des débits de 1 puis de 5 m³/s (EDF/DTG, 1995), a entraîné une sortie de matières en suspension du réservoir de Puyvalador; « pour le long terme, l'ensablement du lit en aval immédiat du barrage jusqu'aux gorges est à craindre, mais, compte tenu de la forme du lit en aval, ces sédiments seront facilement remobilisables par une crue ou un lâcher d'eau automnal » (EDF/DTG, 1995). De fait, la vidange a déposé 10 cm de sédiments piégés dans les végétaux aquatiques dans les premières centaines de mètres. Dans les gorges du Carcanet, le CSP n'a pas enregistré de modifications sensibles, quoiqu'une tendance à l'évacuation et au nettoyage ultérieure ait été notée (Dulac et Nantillon, 1995). Les effets de la chasse se sont dilués vers l'aval et n'ont pas été sensibles après la confluence avec la Bruyante. Les ensablements sont locaux et liés à des travaux ou à des effets de piégeage derrière les prises d'eau en rivière. Cependant EDF veille, par des curages mécaniques (Gesse) ou par des chasses fréquentes (Saint-Georges), à limiter cet ensablement.

En second lieu, il a été observé que la crue de décembre 1996, de fréquence pourtant vingtennale, n'a pas fait sentir ses effets à l'aval immédiat du réservoir de Puyvalador qui a pu stocker un débit de pointe de 23 m³/s. A l'amont de l'aménagement d'Escouloubre, les apports intermédiaires ont fait monter le débit de pointe dans le tronçon court-circuité à environ 4,5 m³/s, et à environ 10 m³/s à l'amont du confluent de la Bruyante. Les débits de la crue n'ont pas été mesurés à l'aval, mais ils ont été très importants, sans commune mesure avec ceux à l'amont (GTHVA, 1998). Cette crue a révélé un phénomène assez inquiétant qui est l'insuffisance

des apports en graviers et en petits galets (nécessaires pour la fraie de la truite). On ne dispose malheureusement pas de données portant sur les stations des gorges du Carcanet, mais le bilan est très nettement à la réduction à l'aval de la Bruyante. Sont mis en cause pour expliquer ce phénomène l'ensablement du lit qui masque les galets à l'amont de la Bruyante et, à l'aval, l'évacuation des graviers déversés en 1995 pour créer des frayères et qui n'ont pas été remplacés par des apports frais en provenance du bassin.

D. Objectifs et méthodologie

L'objectif de cette étude est de dégager les effets du contrôle du régime hydrologique et de l'utilisation du sol du bassin versant sur la dynamique sédimentaire de la Haute Vallée de l'Aude. Il s'agit de déterminer les conditions d'entrée du sable dans le système fluvial et celles de son transit. En ce sens, cette étude tente de répondre à une partie des préoccupations manifestées en 1998 à l'issue des études précédentes. L'approche consiste en premier lieu à quantifier la présence du sable dans le lit mineur de l'Aude et à en observer le transit à l'aide de variables morphologiques (évolution longitudinale des surfaces en plan et en travers du lit mineur en automne et au printemps). L'objectif est ensuite de caractériser l'origine du sable. La mesure de la granulométrie et des concentrations en métaux lourds dans les sédiments fins, d'une part, et l'étude détaillée du bassin versant (linéaire de routes et de pistes, couverture forestière et exploitations, sites d'érosion, carrières), d'autre part, sont les méthodes utilisées pour préciser le rôle des affluents et cartographier les sources naturelles et/ou anthropiques majeures.

Dans le but d'obtenir une bonne représentation de la situation du secteur étudié, 19 stations de relevé morphologique et de prélèvement de sédiment ont été sélectionnées de manière à être régulièrement espacées le long du cours d'eau entre le barrage de Puyvalador et les gorges de Saint-Georges (une tous les 1,5 km environ) (Fig. 1). Les valeurs obtenues pour chaque variable ont été analysées puis combinées afin d'observer les évolutions dans l'espace et dans le temps (recherche d'un gradient de l'amont vers l'aval du système). Les résultats sont présentés en regroupant les sites qui présentent des valeurs relativement similaires. Ce découpage longitudinal du lit de l'Aude en tronçons homogènes permet de visualiser des tronçons aux dynamiques sédimentaires différentes.

Pour observer la situation avant et après la saison des hautes eaux et des crues pluviales et nivales d'hiver et de printemps, deux campagnes ont été effectuées, l'une en septembre 1998 et l'autre en juin 1999. Cependant, les périodes de turbinage à la centrale de Nentilla ont interdit le travail sur la station 19 en automne. Par ailleurs, en raison des opérations d'entretien du canal

d'aménée d'Usson qui, en augmentant les débits, ont rendu l'accès au terrain impossible, un site de la station 12 n'a pas été cartographié en juin 1999. Enfin, les repères marqués à la peinture de la station 17 n'ont pas été retrouvés au printemps. Etant donnée cette fermeture du canal d'aménée d'Usson pendant l'hiver 1998-99, il faut signaler ici que les expérimentations peuvent ne pas illustrer réellement la situation au printemps et l'évolution depuis l'automne, en particulier l'influence de la Bruyante, dans les conditions normales de fonctionnement du réseau hydroélectrique.

II. MORPHOLOGIE DU LIT MINEUR

A. Méthode

La première approche consiste à détailler la morphologie du lit mineur de l'Aude afin de déterminer l'importance du sable et l'évolution spatiale de son recouvrement de l'amont vers l'aval de la vallée. Il s'agit en premier lieu de décrire les différents types de surfaces composant le lit mineur et, en second lieu, de quantifier ces surfaces par des mesures de superficies et de volumes.

A chaque station, un site de mouille (caractérisée par un écoulement lent et profond, un matériel du lit plus fin déposé en phase de récession de la crue) et un site de seuil (caractérisé par un écoulement turbulent à l'étiage, une profondeur faible et un dépôt de matériel grossier) ont été retenus afin de tenir compte de la variabilité locale de la pente du lit. Un transect d'un mètre de large, établi d'une rive à l'autre du lit mineur, a enfin été jaloné et dessiné pour chaque site à l'aide d'une grille (précision de 25 cm). Les types de surface représentés en plan sont les zones végétalisées, les rochers et les blocs, la vase nue ou végétalisée (banquette), le sable fin, le sable grossier et les particules grossières (< 2 cm pour les graviers, 2 à 10 cm pour les galets), avec ou sans présence de sable dans les interstices (Fig. 2).

Les superficies des différents types de surface ont été obtenues sur les croquis à l'aide du logiciel NIH Image. Afin de comparer les stations entre elles, les surfaces calculées sur chaque site ont été rapportées en pourcentage à la totalité de la superficie du transect. La mesure des proportions de sable par type de surface sur des photographies prises sur le terrain (sable : 100 % ; sable et galets : 25 % ; sable et graviers : 12 % ; autre : 0 %) ont permis enfin de calculer la proportion totale de sable sur chacun des transects.

Un intervalle de validité destiné à tenir compte de la relative imprécision des relevés de terrain a ensuite été appliqué aux résultats de la façon suivante : sur chaque transect, la marge d'erreur estimée sur le terrain (+/- 2 cm) x 1 m (largeur du transect) a été multipliée par le nombre de limites entre deux surfaces distinctes, le tout étant rapporté à la superficie totale du transect. La

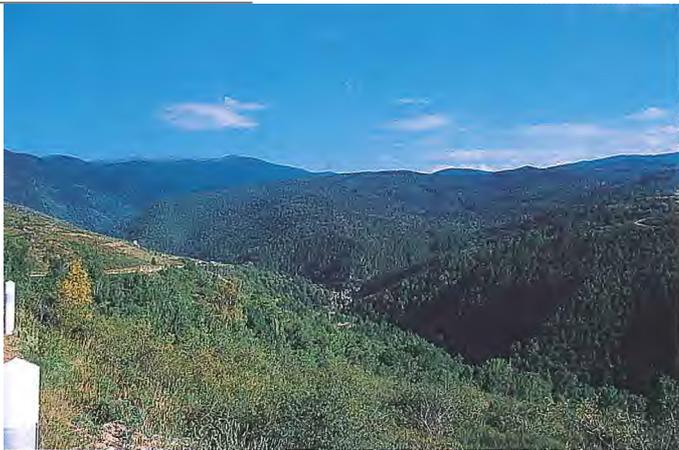


Photo 1. Les gorges du Carcanet



Photo 2. Le barrage du Puy Valador



Photo 3. Ensablement du lit en aval de Puyvalador



Photo 4. Barquette de rétrécissement

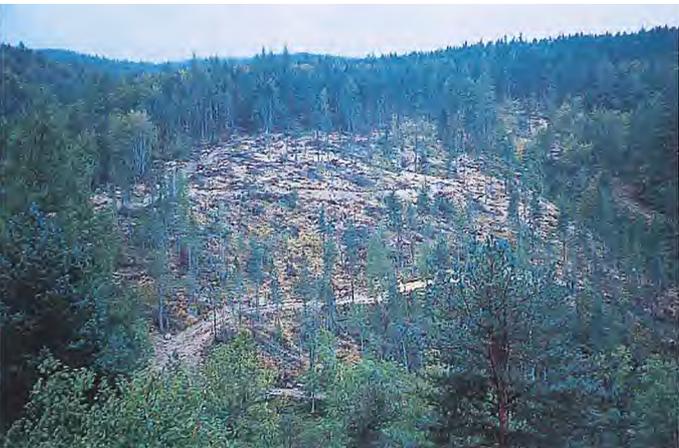


Photo 5. Quérigut - coupe forestière

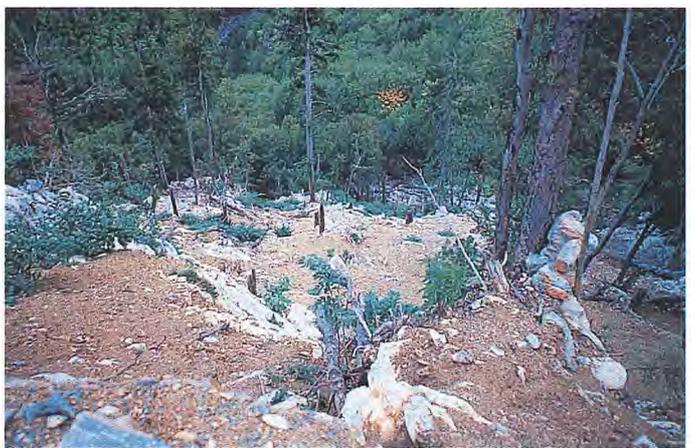


Photo 6. Piste forestière - déblais

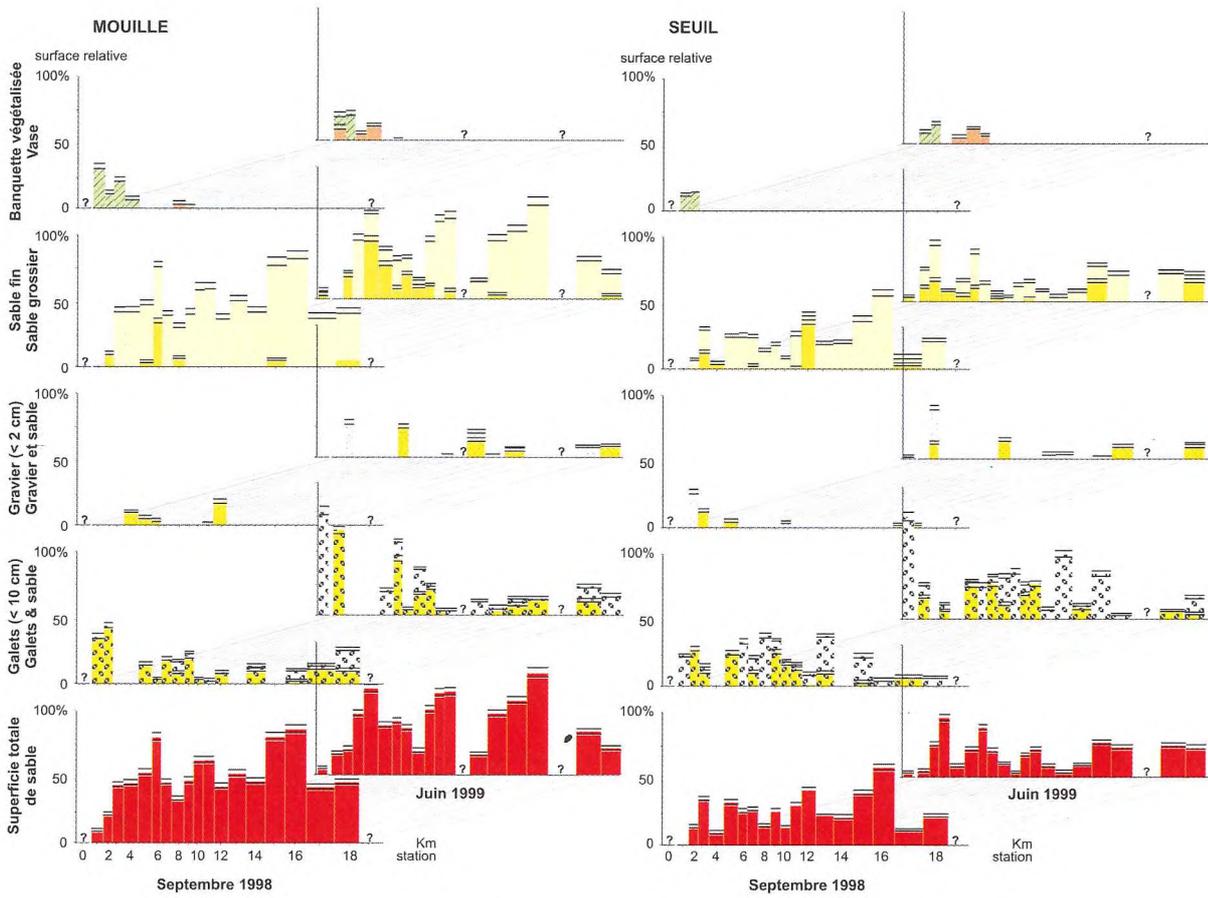


Figure 2. Evolution amont-aval des types de surface des mouilles et des seuils en septembre 1998 et juin 1999

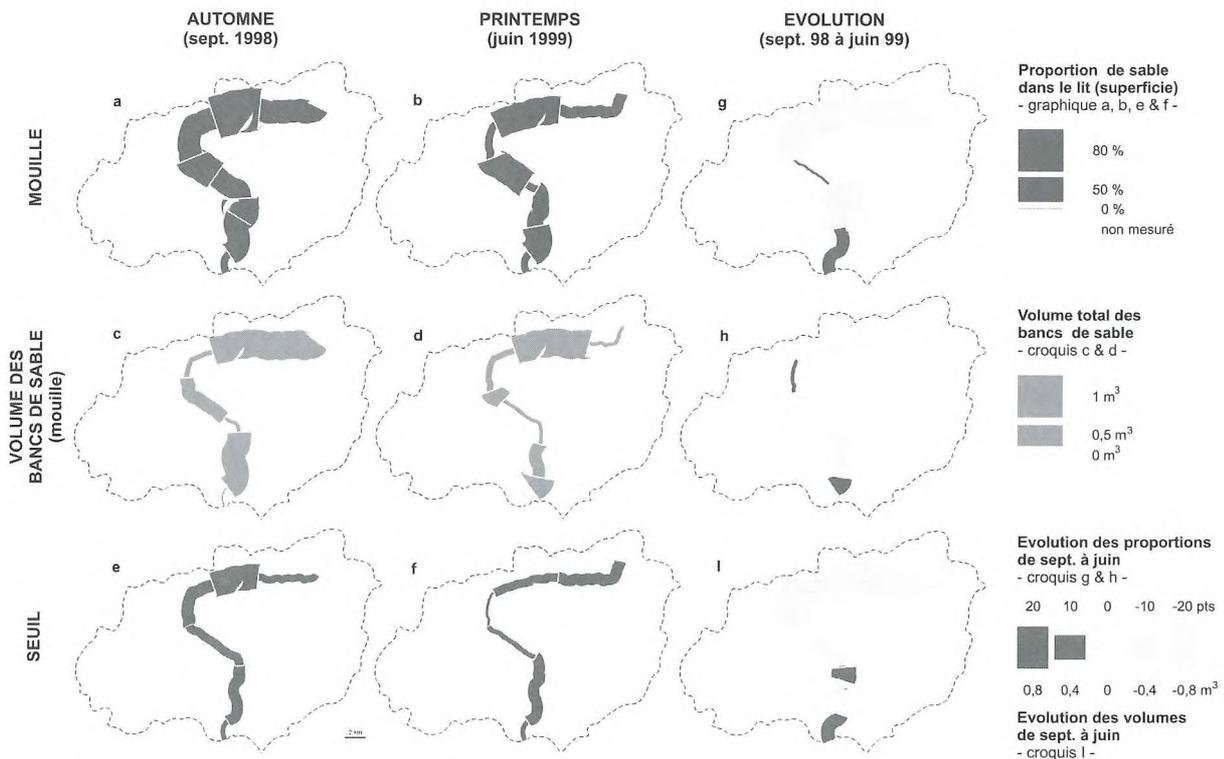


Figure 3. Sectorisation de la Haute Vallée de l'Aude selon l'évolution amont-aval des superficies et des volumes de sable en septembre 1998 et juin 1999

moyenne de ces rapports calculés pour les mouilles et pour les seuils en automne puis au printemps a alors été appliquée aux proportions obtenues pour les formes, aux périodes correspondantes (sur la figure 2, l'intervalle de validité est représenté par des traits positionnés de part et d'autre de la valeur de chaque variable donnée par l'échelle des ordonnées). Les mesures réalisées sur les profils en travers des mouilles ont permis, d'autre part, d'évaluer le volume des bancs de sable, en multipliant la superficie en plan des surfaces de sable et de sable grossier par l'épaisseur moyenne des bancs (moyenne des épaisseurs prises tous les 25 cm).

B. Données sur les dépôts de sable

1. Dépôts de sable dans les mouilles

Les résultats montrent que les mouilles semblent stocker le sable de manière relativement homogène de l'amont à l'aval du secteur étudié (Photo 3). La fraction sableuse domine, en effet, très nettement, en automne comme au printemps (Fig. 2 et Fig. 3ab). Au début de l'automne 1998, la quasi-totalité des mouilles possède un taux d'ensablement supérieur à 50 %, sauf dans le tronçon situé immédiatement à l'aval du barrage de Puyvalador, où il ne dépasse pas 25 %, et dans la partie intermédiaire des gorges du Carcanet. Le taux de recouvrement est au contraire très élevé sur le site 6 (qui se situe à l'aval du Capelier où des proportions de 80 à 90 % de sable ont été observées dans le torrent), sur les sites 15 et 16 (plus de 75 %), et, à un degré moindre, avant la confluence avec la Bruyante. Celle-ci semble ne pas avoir d'influence sur les résultats à l'aval, dans les gorges de l'Aude.

À la fin du printemps 1999, le sable est relativement moins important qu'au début de l'automne précédent puisque la moyenne de l'ensemble des sites est de 40 %. La comparaison avec l'Aude à l'amont du barrage de Puyvalador montre une différence importante. L'évolution longitudinale des proportions de sable est, d'autre part, moins homogène, les contrastes entre les tronçons étant particulièrement nets. Il faut interpréter ce trait comme l'effet nettoyant des débits fournis par les affluents dans les gorges, en particulier la Bruyante qui semble avoir eu une certaine influence juste à l'aval de la confluence, les crues ayant permis un nettoyage différencié des tronçons.

Les volumes des bancs de sable mesurés dans les mouilles varient de zéro à plus d'1 m³ en septembre 1998. L'évolution longitudinale est particulière avec des tronçons voisins très contrastés, passant chaque fois d'un extrême à l'autre en allant de l'amont vers l'aval (Fig. 3cdh). Les quantités de sables sont également moins importantes après l'hiver. Le volume moyen en juin 1999 est de 0,3 m³ (contre 0,45 m³ en septembre). Les contrastes restent toutefois importants d'un tronçon à l'autre.

Entre l'automne et le printemps, les volumes des bancs de sable sont donc majoritairement en diminution. Le partage en tronçons homogènes montre toutefois que les modifications concernent surtout la partie amont des gorges du Carcanet.

L'évolution dans le temps des proportions de sable (Fig. 3g) montre tout d'abord que le secteur de faible pente à l'aval du barrage de Puyvalador et surtout le haut des gorges du Carcanet ont connu une augmentation, probablement parce que le principal affluent, le Rec del Gué, n'a pas fourni des débits suffisants pour assurer le nettoyage du lit. Plus à l'aval, la partie intermédiaire des gorges du Carcanet a subi un processus d'autonettoyage, visible tant par les surfaces que par les volumes concernés; c'est plus net si l'on considère les surfaces, ce qui doit signifier que des placages de faible épaisseur et en position de reprise, ont été évacués. En revanche, la masse de sable est peu affectée. Les petits affluents ont dû apporter les débits nécessaires à ce processus : un pic à 3 m³/s a ainsi été enregistré à la station de jaugeage d'Escouloubre amont (DIREN, 1998).

La situation est restée remarquablement stable dans la partie aval des gorges du Carcanet, à l'amont de la confluence de la Bruyante. Si les surfaces ensablées n'ont quasiment pas été modifiées, on enregistre cependant une légère réduction du volume de sable. Le lit, relativement plat, doit avoir une géométrie le rendant peu propice à l'accumulation de masses de sable importantes; dans ce cas, une variation de débit permet un léger déstockage de sable sans affecter la surface des plages piégées en arrière des blocs. En 1996, un débit de 15,8 m³/s a été enregistré (DIREN, 1998); il permet très probablement un bon nettoyage du lit. À l'aval de la confluence de la Bruyante, la tendance est à considérer de manière contradictoire. Les surfaces en sable se sont fortement réduites, ce qui dégage les éléments grossiers du lit; pour autant, les volumes affectés sont modestes, comme si les crues avaient déplacé le sable de ce tronçon en construisant des bancs de sable plus épais, ce qui compenserait la réduction de surface. Enfin, on peut remarquer que la réduction des surfaces est plus marquée à l'amont du tronçon qu'à l'aval, alors que c'est l'inverse pour les volumes.

2. Dépôts de sable des seuils

Conformément au schéma général qui veut que les seuils soient formés de particules grossières, la fraction sableuse ne domine plus sur les seuils (Fig. 2). Elle y est cependant importante, à l'automne comme au printemps, ce qui est exceptionnel pour un torrent de montagne. Le pourcentage moyen de recouvrement de sable en automne est de 25 %. Les surfaces recouvertes par le sable sont plutôt modestes dans les gorges du Carcanet. Les proportions baissent à nouveau dans les gorges de l'Aude, à l'exception de la partie intermédiaire où le taux

de recouvrement est plus important que dans tout le reste du secteur étudié. Le partage en tronçons homogènes (Fig. 3ef) montre la relative uniformité de la situation sur les seuils, à l'exception de ce même tronçon. On constate aussi que la variabilité spatiale est moins forte sur les seuils que sur les mouilles.

Comme dans le cas des mouilles, le lit de l'Aude présente moins de sable à la fin du printemps qu'au début de l'automne (proportion moyenne sur tous les sites = 17 %). Les proportions diminuent de l'amont vers l'aval sur l'ensemble du secteur étudié, sauf à l'extrême aval. La comparaison avec les résultats des deux sites de l'amont du barrage de Puyvalador montre que la différence est réelle pour les seuils entre la situation dans les gorges et celle qui prévaut dans le Capcir (moyenne = 5,5 %). La sectorisation illustre la faiblesse des contrastes, mais révèle, semble-t-il, le rôle de la Bruyante dans l'évacuation des sables; on note que les seuils situés à l'aval de la confluence de la Bruyante paraissent moins propices au piégeage du sable que ceux des gorges plus à l'amont.

Enfin, l'évolution dans le temps de la présence du sable sur les seuils est proche de celle observée dans les mouilles (Fig. 3i). L'analyse n'a porté que sur les surfaces ensablées, les volumes étant insuffisants pour se prêter à une mesure fiable. On note une nouvelle fois que les gorges du Carcanet sont propices au stockage, malgré les montées d'eau probablement enregistrées entre septembre 1998 et juin 1999. Cette remarque illustre bien le caractère très artificialisé des écoulements et des conditions de mobilisation de la charge fine.

En revanche, le cours de l'Aude à l'aval de la Bruyante révèle un déstockage efficace, sans doute lié aux forts débits de la Bruyante. A l'appui de cet argument basé sur l'analyse de transects, on peut faire état d'observations géomorphologiques faites en septembre 1998 à l'aval du bassin de Gesse, dans le secteur de la perte de l'Aude. Sur le site de la perte, une mouille du lit de l'Aude est fortement ensablée. En revanche, le lit est à sec à l'aval de la perte puisque le débit réservé est inférieur au débit de saturation du siphon (6001/s, soit 1/10 du module); dans ce tronçon court-circuité par la perte, le lit présente une accumulation de galets et de petits blocs remaniés par les crues, mais il ne possède pas de dépôts sableux. Le sable est à nouveau observé à l'aval de la restitution des eaux par la perte. Cette discontinuité justifie une explication. Les débits de crue noient la totalité du lit fluvial et ont un effet décapant sur toutes les classes de taille. Dans la phase de récession de l'hydrogramme, le charriage cesse progressivement, mais la turbulence se maintient suffisamment pour permettre l'entraînement du sable. A la fin de la crue, le débit passe par la perte; sa réduction progressive permet le dépôt de sable dans le talweg à l'amont de la perte, d'autant que l'accumulation de galets du tronçon court-

circuité fait barrage et réduit les vitesses. Les petits débits sont favorables à l'accumulation estivale de sable à l'amont et à l'aval de la perte, laissant ainsi le tronçon en galets déconnecté pendant plusieurs mois, sauf épisode hydrologique exceptionnel. Cette analyse démontre la capacité qu'a l'Aude d'autonettoyer entièrement son lit à l'aval du confluent de la Bruyante.

C. Autres types de surfaces

Deux autres types de surface méritent également d'être commentées. Il s'agit, d'une part, des surfaces en galets, qui correspondent pour partie (la fraction en graviers et petits galets) aux habitats choisis par les poissons pour creuser leur frayère et, d'autre part, des « banquettes » herbeuses observées à l'amont.

I. Les surfaces en galets

Les cours d'eau situés à l'amont du barrage de Puyvalador donnent une image des conditions naturelles. En effet, les sites étudiés sur l'Aude (station 0) présentent en moyenne des pourcentages de surfaces en galets de 52 % (mouilles) à 62 % (seuils) en juin 1999 (Fig. 2). Il faut toutefois noter que, même dans les conditions naturelles, l'Aude recevait un volume de sable important dans les gorges du Carcanet; on ignore cependant quel était le taux de recouvrement avant la construction du barrage de Puyvalador.

Sur les stations de l'Aude court-circuitée, la proportion moyenne des surfaces en galets est de 12 % au début de l'automne 1998 et de 16 % à la fin du printemps 1999 dans les mouilles, et respectivement de 19 % et 20 % sur les seuils (Fig. 2). Les conditions de la période de forte hydraulité n'ont donc pas d'effet significatif. On remarque que, malgré le ralentissement du courant dans les mouilles, celles-ci peuvent conserver des surfaces notables en galets frais, quels que soient les tronçons. En fait, l'écoulement du débit réservé se fait dans un lit emboîté dans le chenal primitif surdimensionné; le fond en galets est visible entre des berges ou des bancs sableux. Les surfaces en galets sont proportionnellement plus importantes, en automne comme au printemps, sur les seuils et dans les mouilles de la partie aval des gorges du Carcanet.

On constate enfin que, sur les seuils, la diminution des surfaces en galets est très régulière de l'amont vers l'aval en automne. Cette réduction, qui n'est pas le négatif du comportement du sable, est en partie liée à l'importance croissante des blocs non transportables par les débits de crue. On pourrait se trouver devant le phénomène de tarissement de la charge de fond de petit calibre, les graviers et petits galets disparaissant par tri sélectif à l'aval du confluent de la Bruyante, faute d'entrées suffisantes dans le système fluvial. En revanche, dans les gorges du Carcanet, les débits influencés sont insuffisants pour

mettre en mouvement les galets qui restent donc en place; les mesures effectuées montrent bien la place secondaire occupée par les blocs bien que l'on soit dans un tronçon où les versants, très raides, et la moraine glaciaire ont alimenté le talweg en très nombreux éléments de grandes dimensions. Cet effet favorable de la réduction des débits annihile l'effet négatif du piégeage de la charge de fond dans le réservoir de Matemale. Notons enfin que les affluents des gorges du Carcanet n'amènent pas de galets, car ils érodent le régolithe (arène sableuse « pourrie ») du batholite de Quérigut. Le transit des graviers et galets est en quelque sorte « gelé » par les conditions hydrauliques régnant depuis les années 1930, à tout le moins depuis la construction du réservoir de Matemale. Les débits de pointe enregistrés à l'aval des gorges de Carcanet sont cependant susceptibles de mettre en mouvement les graviers et les galets; il est possible que ce tronçon ait enregistré une réduction de son potentiel par rapport à l'état naturel.

2. Les banquettes latérales

Les banquettes sont des bancs de vase relativement épais recouverts d'une végétation semi-aquatique (Photo 4). Elles sont observées sur les cinq premiers kilomètres du tronçon étudié, en particulier dans les mouilles, mais elles existent aussi sur les seuils à l'amont de ce secteur, dans la partie de plus faible pente (Fig. 2). Ces banquettes semblent s'être développées sur les dépôts provenant de la vidange et des ouvertures de vannes de fond du barrage de Puyvalador. Le processus de dépôt est entretenu à l'aval du pont de la Forge par des apports fins en provenance du Rec del Gué et surtout, semble-t-il, par les rejets de fines de lavage effectués par la carrière de Puyvalador.

La fixation de la banquette est particulièrement favorisée par la faible pente du tronçon de l'Aude située à l'amont des gorges du Carcanet et par un fort éclaircissement à la traversée de prairies. Dans les gorges, la végétation paraît contrôlée par un faible éclaircissement sous la ripisylve et par le nettoyage assuré par les petites crues d'hiver; les bancs de vase se reforment plus loin à l'aval et sont recolonisés dès le printemps.

D'un point de vue morphologique, les banquettes ont pour effet de rétrécir le lit mineur qui ajuste sa géométrie au débit réservé. Composées de vases et de sable fin, riches en matière organique, colonisées par des végétaux semi-aquatiques et riches en abris, elles semblent avoir une valeur écologique non négligeable (présence de batraciens par exemple). C'est un type original de milieu neuf créé par effet d'impact.

III. L'ORIGINE DES SÉDIMENTS

A. Le rôle des affluents

1. Granulométrie du sable

Les variations longitudinales de la granulométrie du sable enregistrées sur les différents tronçons de la rivière ont été mises en évidence à l'aide de la méthode de l'image CM (Passega, 1964). Cette approche, qui lie deux paramètres de la courbe granulométrique cumulative (la médiane et le percentile le plus grossier) aux modes de transport et de dépôt des sédiments, permet d'interpréter les différents milieux de dépôt en fonction de l'énergie du cours d'eau. Des études effectuées sur le Haut-Rhône, sur l'Arve et sur la Saône ont montré en effet que l'image CM change d'un tronçon à l'autre d'un cours d'eau en fonction de variables qui sont notamment la pente et le débit (Bravard, 1983; Peiry, 1988; Astrade et Bravard, 1999).

Les prélèvements de sédiments ont été réalisés dans les dix-neuf stations de l'Aude ainsi que dans la Bruyante et l'Aiguette. Le choix a été fait de prélever les sables les plus grossiers des mouilles de chaque site afin de déterminer le mode de transport et d'observer les effets du tri hydraulique sur le plan longitudinal. Chaque échantillon a été trié à l'aide de tamis de différentes tailles (40 à 1.600 μ m). De la courbe granulométrique cumulée (poids cumulés rapportés en pourcentage au poids total de l'échantillon) sont ensuite extraites les valeurs de C (99 %) et de M (50 %). Il faut noter que le choix d'écrêter l'échantillon à 2.000 microns pour ne conserver que les sables fait que les granules ont été exclues de l'analyse; la forme de l'image CM s'en trouve légèrement affectée pour les valeurs du percentile le plus grossier.

La position des échantillons de sable sur l'image CM (Fig. 4a) montre qu'il n'y a pas de mise en suspension et de redépôt des sédiments sableux les plus grossiers dans l'axe du talweg. Le transport par suspension existe, puisque les berges sont faites de sédiments fins, mais il ne se produit que pour les rares périodes d'augmentation du débit. Dans l'axe du chenal, les vitesses du débit réservé sont suffisantes pour évacuer les particules d'un diamètre maximum inférieur à 1.200 microns et d'une médiane inférieure à 250 microns; le fonctionnement normal de la totalité des sites est caractérisé par un transport des sables qui s'opère par roulement.

L'évolution longitudinale de la médiane de l'amont vers l'aval du cours d'eau (Fig. 4b) montre une augmentation dans le secteur des gorges du Carcanet, probablement parce que les conditions hydrodynamiques favorisent l'exportation de la fraction fine et parce que les affluents amènent des granules. On note ensuite un net effet de la Bruyante qui est capable de recurer entièrement le lit de l'Aude lors de ses crues. La Bruyante in-

jecte toutes les classes de taille dans l'Aude, mais l'abaissement de la médiane des sédiments fins paraît être dû aux conditions hydrodynamiques qui prévalent à la décrue et entre les crues; la largeur du lit, la faible profondeur et la présence de blocs sont favorables au piégeage des fines à la décrue. On voit donc que, globalement, le sable du lit de l'Aude à l'aval de la confluence est roulé, mais plus fin que dans les gorges du Carcanet. Une nouvelle augmentation apparaît ensuite dans la partie aval des gorges de l'Aude, peut-être liée à des effets anthropiques locaux (curage d'un bassin). Enfin, l'Aiguette joue également un rôle en abaissant la médiane après la confluence, probablement en raison des conditions hydrodynamiques qui caractérisent le lit de l'Aude et de la nature de la charge en suspension de l'Aiguette qui érode des dépôts issus de carrières.

2. Concentration en métaux lourds

Le principe de la seconde analyse est d'utiliser comme marqueurs les métaux présents en très faibles quantités dans les alluvions et ainsi de déterminer les sources de production sédimentaire. Les teneurs en métaux varient à cause de l'érosion de terrains plus riches en minéralisations, sous l'effet de la dilution ou des processus de tri hydraulique et de dépôt des particules plus denses (Wolfenden et Lewin, 1978), ou sous l'influence d'activités humaines polluantes. Dans ce cas, les métaux lourds sont les marqueurs d'une composante anthropique de la masse alluviale (Macklin et Klimek, 1992). Ainsi, l'augmentation ou la diminution des teneurs métalliques reflète la nature des roches soumises à l'érosion, renseigne sur les processus de la dynamique fluviale et signale l'impact d'activités humaines.

Les échantillons de sable fin prélevés dans les stations, à l'amont et à l'aval des confluences ainsi que dans chacun des principaux affluents, ont été soumis à une préparation rigoureuse. Après un tamisage destiné à ne retenir que la fraction de sable inférieure à 1 mm, chaque échantillon a été finement broyé au mortier d'agate. Pour la mise en solution, 20 mg de la poudre obtenue ont subi une attaque totale aux acides fluorhydrique, nitrique et perchlorique dans un becher en téflon. Après un chauffage à 1.000°C à becher fermé pendant 12 heures, les échantillons ont subi une évaporation à sec dont le résidu a été remis en solution à froid dans 2 ml d'acide nitrique et 8 ml d'eau distillée. Ces solutions ont été analysées au spectromètre à plasma d'argon qui permet de mesurer les concentrations les plus faibles de tous les éléments. Cependant, même après la sélection d'éléments inférieurs à 1 mm, la granulométrie des échantillons reste très disparate, empêchant la prise en compte des seules valeurs des concentrations métalliques; ce sont, en effet, les particules fines qui sont susceptibles de retenir une grande partie de la contamination en éléments-traces. On utilise alors le biais de la normalisation au titane pour corriger les valeurs des concentra-

tions. Dans un prélèvement, la teneur en titane varie en proportion de la quantité d'argile; de fortes teneurs en titane sont donc la marque d'une plus forte proportion d'argile dans l'échantillon. Le titane a été choisi, car il présente l'intérêt de ne pas faire partie des minéralisations des filons dans le batholite de Quérigut. Les variations de sa concentration sont donc essentiellement dues à la présence de la fraction argileuse.

La figure 5 reprend trois des douze métaux mesurés. On observe une augmentation des ratios au fur et à mesure de la descente vers l'aval dans le secteur du batholite granitique. Un décrochement important ramène les courbes à des valeurs plus faibles à l'aval de la confluence avec la Bruyante. Les valeurs augmentent par la suite jusqu'à l'aval, mais plus faiblement. La baisse des valeurs des ratios à l'aval des confluences s'explique par un phénomène de dilution du matériel alluvial de l'Aude dans les apports moins riches en métaux des affluents. C'est le cas du Rec del Gué, mais sa contribution semble assez modeste. La Bruyante tient en revanche la place la plus marquante. On remarque, en effet, la chute très nette des teneurs à l'aval de la confluence. Les alluvions de l'Aude ont alors des teneurs proches de celles de la Bruyante. On peut penser que sa contribution à l'alimentation sédimentaire de l'Aude est loin d'être négligeable.

L'Aguzou et l'Aiguette sont deux cas particuliers. Les teneurs des alluvions de l'Aude baissent légèrement ou restent stables après les confluences. Cependant, contrairement aux autres affluents, les teneurs métalliques de leurs alluvions sont plus élevées que celles de l'Aude. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer ce résultat. Il peut y avoir tout d'abord un retard dans le mélange des masses sédimentaires des deux cours d'eau. Mais cette hypothèse paraît peu probable dans un cours d'eau en gorge et étroit comme l'Aude. Un effet de chasse hydraulique, provoqué par l'affluent, qui peut aussi avoir pour conséquence la remobilisation des particules de la fraction sableuse, y compris les métaux lourds, susceptibles de s'être déposés en placers. Une disproportion trop grande entre les apports solides de l'affluent et la masse alluviale déjà en transit dans l'Aude peut enfin expliquer l'absence de hausse des teneurs.

Indépendamment du jeu des facteurs lithologiques, l'augmentation des teneurs peut trouver son origine dans les conditions hydrologiques actuelles de l'Aude. Dans des conditions d'écoulement gouvernées par les débits réservés, le jeu des affluents ou des restitutions après turbinage est d'un grand poids. L'arrivée d'eau en relative abondance après des mois d'indigence peut provoquer un effet d'eau claire, accroître la compétence et favoriser la prise en charge et le transport des particules. C'est le cas au confluent de la Bruyante. Inversement, l'augmentation des teneurs métalliques dans les tronçons court-circuités, à l'extrémité aval de ceux-ci, serait

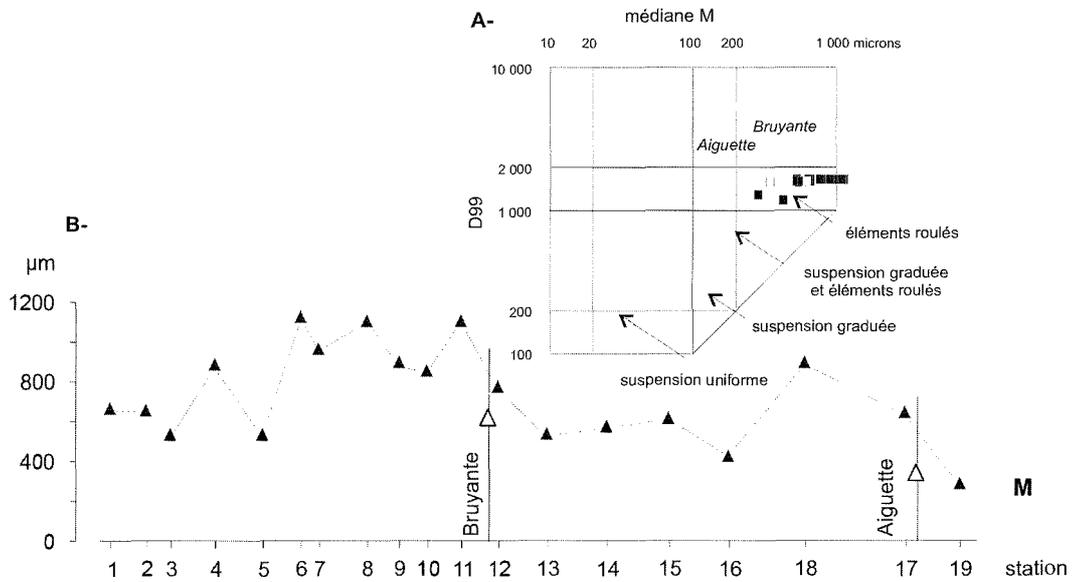


Figure 4. Evolution amont-aval de la granulométrie des sables grossiers.
 A : répartition des échantillons sur l'image CM ; B : évolution de la médiane (M = 50 %)

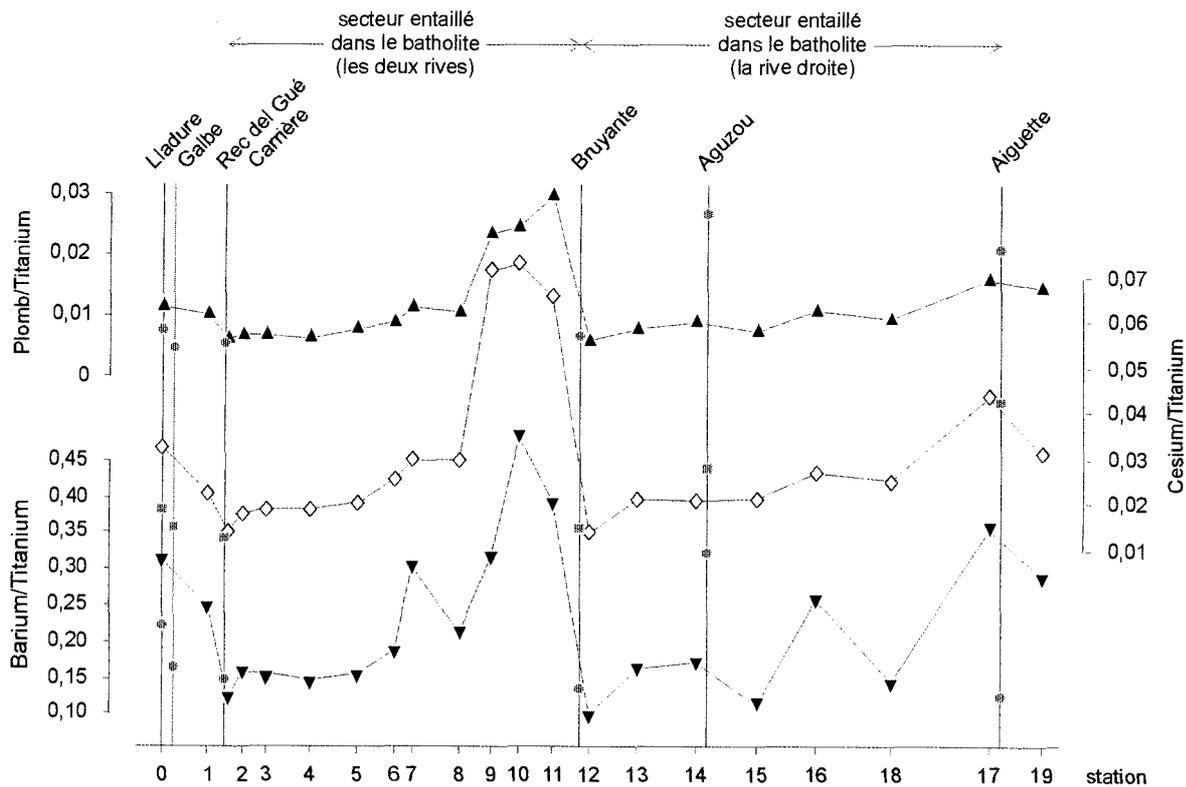


Figure 5. Evolution amont-aval des concentrations en métaux lourds des sédiments fins

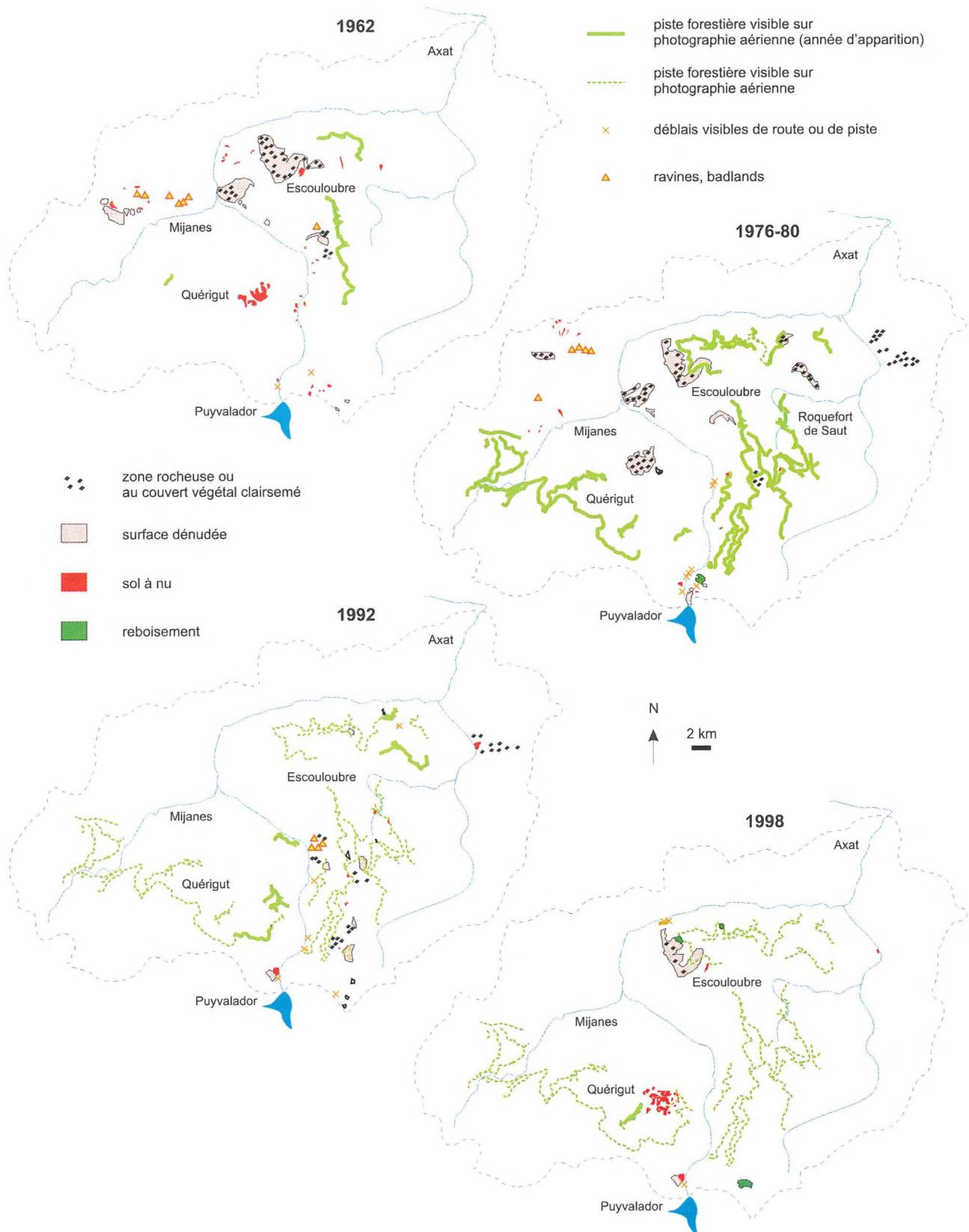


Figure 6. Evolution des sources de sédiments par interprétation de photographies aériennes

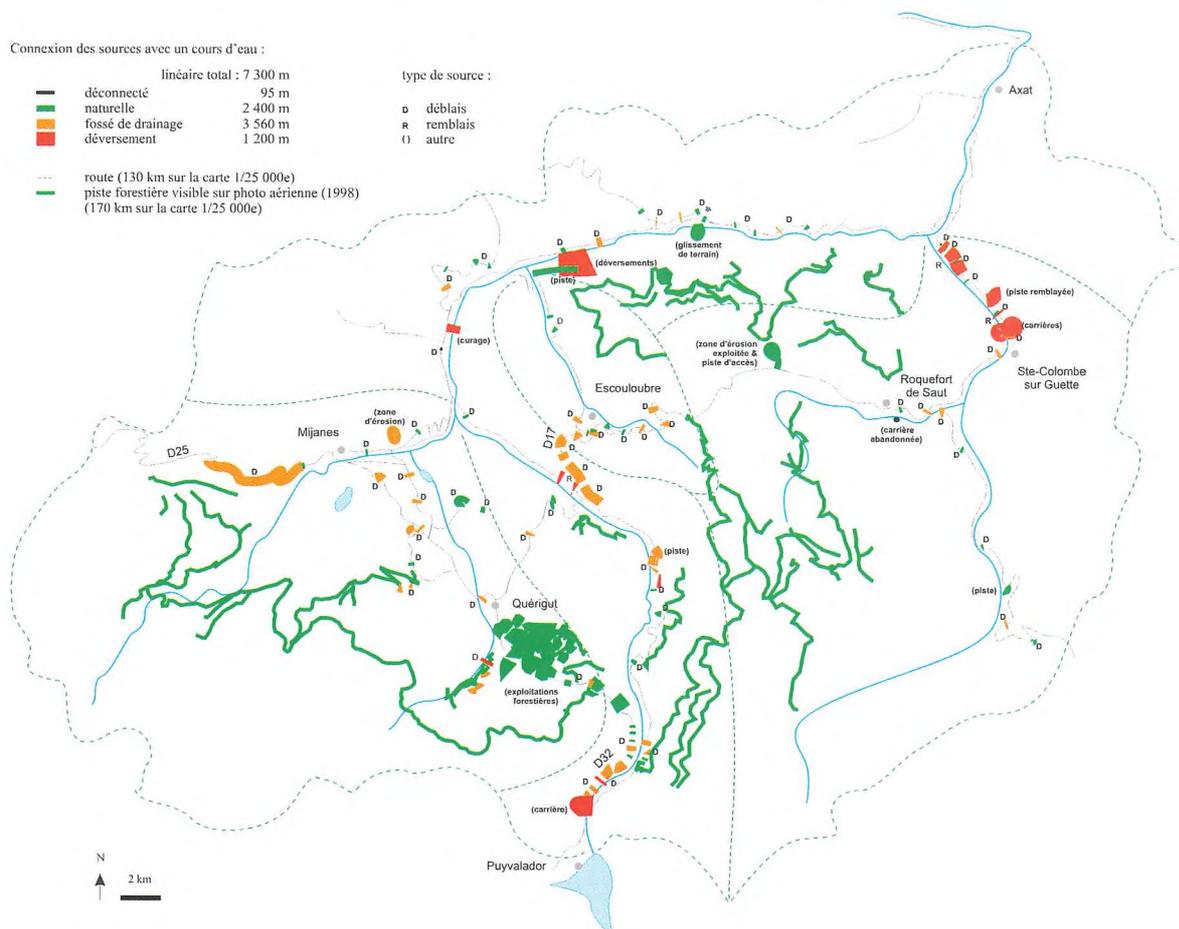


Figure 7. Les sources anthropiques de sédiments et leur connexion avec un cours d'eau drainant

alors le reflet du défaut de compétence du cours d'eau à transporter la totalité de sa charge solide. Les particules les plus denses (les métaux lourds en l'occurrence) auraient ainsi tendance à s'accumuler par tri densitaire. Le transport se ferait encore, mais au seul profit des fractions les plus légères. Cela rendrait compte de l'accumulation des métaux dans la partie terminale des tronçons. Les confluents et les restitutions interrompent donc ce phénomène de concentration parce qu'ils permettent temporairement un accroissement de la compétence. La quasi-totalité du matériel sableux semble alors susceptible d'être à nouveau prise en charge, y compris les particules contenant des métaux lourds. Le phénomène de concentration reprend à l'aval parce que l'eau est à nouveau dérivée et que la fourniture sédimentaire des versants augmente la masse alluviale. Le transport sélectionne alors les seules particules pouvant être mobilisées, à savoir les moins denses.

B. Etat de la surface du bassin

I. Méthode

Les origines naturelles et anthropiques du sable et leur évolution dans le temps ont été déterminées par l'étude de l'état actuel de la surface du bassin versant et de son

évolution récente. Une typologie des sources de sédiments a tout d'abord été dressée, incluant les sites d'érosion naturelle (*badlands*, mouvements de versants), les zones d'exploitation de la forêt et du sol (coupes et plantations, pistes forestières, carrières) et le réseau routier (déblais, remblais, fossés de drainage). Ces types de sources ont ensuite été précisément cartographiés à l'aide d'archives et de photographies aériennes (missions IGN 1962, 1976, 1980, 1985, 1992 et 1998) (Fig. 6). Les sites et les linéaires recensés le long des routes goudronnées en automne 1998 ont été classés selon leur degré de connexion à un talweg (Fig. 7).

2. La couverture forestière

La forêt représente aujourd'hui 56 % de l'occupation du sol dans le bassin de la Haute Vallée de l'Aude à l'aval du barrage de Puyvalador (Fig. 1a). Elle se répartit de façon homogène, exception faite des marges du bassin, en raison de leur altitude, d'un noyau central correspondant aux zones de faible pente vouées à l'agriculture (dépressions du Donezan et du Pays-de-Sault) et des « *soulanes* » (versants exposés très dénudés). A l'opposé, de très vastes étendues boisées se retrouvent sur les versants hauts et abrupts des gorges. La figure 6 montre l'évolution de l'exploitation de la forêt depuis

1962. Celle-ci s'avère être peu intensive, contrairement à la situation vécue dans le reste des Pyrénées-Orientales. Les coupes sont relativement limitées avec, à leur apogée en 1962 et 1980, l'exploitation de seulement 4 % et 3 % de la forêt du bassin. Cependant, vers Quérigut, des coupes sévères ont été pratiquées ces dernières années. Elles laissent apparaître des parcelles de plusieurs hectares au sol mis à nu (Photo 5).

Mis à part ce secteur, le bassin est dans une période de reconquête végétale liée à la déprise agricole, avec même l'apparition de plusieurs aires de plantation en 1998. Les pistes forestières sont, par contre, nombreuses (170 km), en particulier depuis la période de travaux intenses des années 1970. Les plus importantes, visibles sur les photographies aériennes, se trouvent dans les bassins de la Bruyante et de l'Aiguette et sur les versants de rive droite des gorges de l'Aude. Il est reconnu que des coupes et surtout des pistes forestières, de la façon dont elles sont taillées (forte pente et sol à nu), sont des zones de forte évacuation. Les exemples les plus flagrants sont les coupes le long de la D32 entre Puyvalador et Quérigut et la piste taillée au début des années 1990 en rive gauche de l'Aude, à l'aval de la confluence avec l'Aguzou. A cet endroit, les volumes de terre déblayés ont été déversés directement sur le versant jusque dans l'Aude (Fig. 7, Photo 6).

3. Les zones d'érosion

Les formes d'érosion naturelles du bassin sont relativement actives. A Gesse, par exemple, un glissement de terrain a introduit, il y a quelques années, une charge importante dans l'Aude. Des *badlands* apparaissent vers Mijanes et dans les gorges du Carcanet (Fig. 6), plus ou moins selon les années de prise de vue, mais les cicatrices sont toujours très visibles aujourd'hui. Leur degré de connexion au lit fluvial est très variable, mais deux secteurs se remarquent : celui de la ravine de Mijanes, dont les éléments érodés sont emportés directement dans la Bruyante, et les *badlands* de Roquefort-de-Sault, dont la partie inférieure est exploitée et dont la piste d'accès draine des volumes importants de sédiments (Fig. 7).

À ce titre, les carrières de Puyvalador et de Sainte-Colombe jouent aussi un rôle par l'introduction de fines dans les écoulements. La première, la plus importante, est aujourd'hui sept fois plus étendue qu'en 1980, alors que la seconde n'est visible sur les photos aériennes que depuis le début des années 90 (Fig. 6 et 7). Les rejets de fines de lavage semblent être en partie à l'origine de la présence des banquettes végétalisées dans le lit de l'Aude; sont en cause le lavage du carreau d'exploitation par les pluies, le fonctionnement déficient des bacs de décantation et la reprise de dépôts déversés dans un affluent.

Les espaces agricoles du bassin, à partir du moment où

ils n'ont plus été entretenus régulièrement en raison de la déprise agricole, semblent être également à l'origine d'une activité géomorphologique non négligeable. Lagasque (1984) note, en effet, que la dynamique de ces petits bassins versants montagnards semble prendre un cours plus agressif au fur et à mesure de l'abandon anthropique. Le manque de drainage par colmatage des canaux, par exemple, conduit à l'engorgement des terrains et provoque des mouvements de masse.

4. Le réseau routier

Les dernières sources anthropiques de sédiments observées sont les routes et leurs bordures. Sur les 130 km de routes goudronnées du bassin, de nombreuses zones susceptibles de fournir plus ou moins directement des sédiments ont été repérées (Fig. 7). Elles représentent un linéaire de 7,3 km dont les deux tiers sont en connexion directe avec le réseau hydrographique (talus avec fossé de drainage, déversement). La moitié de ce linéaire est longée par des fossés de drainage dont les plus caractéristiques sont ceux de la D32 (à l'aval de Puyvalador), de la D25 (entre Mijanes et la station de ski) et de la D17 (des Bains d'Escouloubre au col des Moulis).

Trois expérimentations sur le déplacement des sédiments de quelques-uns de ces talus et de ces fossés de drainage ont permis de montrer la pertinence de l'inventaire de ces aménagements. Premièrement, tous les jalons (clous de 12 cm) plantés en septembre 1998 à la surface d'un talus érodé de la D25 ont été retrouvés entièrement déchaussés en juin 1999. Deuxièmement, le marquage des sédiments présents dans le fossé de drainage de la D25 a montré une dynamique importante; sur les cinq sites marqués à la peinture (un carré d'un mètre de côté sur chaque site), les sédiments ont été déplacés de 1 à 13 m en douze jours, à l'exception d'un site végétalisé. Du 8 au 20 octobre, les précipitations (54 mm) à Roquefort-de-Sault ont été supérieures à la moyenne de la période (36 mm), mais elles sont toutefois loin de pouvoir être considérées comme exceptionnelles. Enfin, sur un talus de la D32, une surface d'1 m² de granite altéré marqué à la peinture le 8 octobre 1998 était entièrement décapée et évacuée par le fossé douze jours après.

5. Répartition des sources dans le bassin

Les résultats obtenus montrent une influence assez importante des activités humaines. Six zones sont mises en évidence dans le bassin (Fig. 7). Il y a premièrement celle à l'aval de Puyvalador, qui regroupe les effets du barrage et de la carrière. L'étude sur la vidange du printemps 1995 (Dulac et Lentillon, 1995) a montré le rôle des entretiens décennaux de la retenue dans l'introduction de sédiments. D'autre part, des prélèvements de matières en suspension réalisés pendant une ouverture trimestrielle de la vanne de fond du barrage (automne 1998) ont montré que la lame d'eau ne transporte pas de

sable, mais uniquement de la vase qui se dépose sur le premier kilomètre de ce tronçon. La carrière, quant à elle, contribue à l'entrée de fines qui prolongent l'effet de la vidange.

La deuxième zone est celle des talus de la D32 (route de Quérigut à l'amont des gorges du Carcanet) et la troisième celle de la D17 (des Bains d'Escouloubre au col des Moulis, en limite du bassin de l'Aguzou) où les talus sont frais sur presque toute la longueur et les fossés de drainage très bien entretenus. Le secteur suivant est celui du bassin de la Bruyante, et plus particulièrement des talus et des fossés de la D25 (de Mijanès à la station de ski), des nombreuses pistes forestières et des exploitations de Quérigut. Les deux dernières zones sont celles des gorges de l'Aude et du bassin de l'Aiguette. La première regroupe le curage récent de la retenue d'Usson, le bassin de l'Aguzou, les deux cônes de déversement frais de la piste forestière proche de la confluence, l'ancien glissement de terrain et les pistes du versant de rive droite. Celle de l'Aiguette rassemble les pistes forestières de l'amont du bassin, la carrière de Sainte-Colombe et les considérables remblais de la D17 dont les matériaux marquent fortement la rivière et l'Aude à l'aval de la confluence.

IV. LA DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE

La morphologie du lit mineur de l'Aude est anormalement affectée par l'ensablement, même s'il est naturel que du sable transite et se dépose dans les chenaux alimentés en arène granitique par un important batholite recouvert d'altérites. Les mouilles stockent le sable de manière assez systématique sur l'ensemble du linéaire de l'Aude, mais l'importance de l'ensablement varie d'un site à l'autre en fonction de l'hydrologie du tronçon concerné et des caractéristiques géométriques des mouilles. La partie aval des gorges du Carcanet et le tronçon intermédiaire des gorges de l'Aude sont les plus touchés. La fraction sableuse est moins importante sur les seuils, mais le recouvrement est de toute façon exceptionnel pour un torrent de montagne.

Malgré l'altération de l'hydrologie par les aménagements hydroélectriques, l'Aude conserve la capacité d'expulser une partie des dépôts sableux lors des hausses de débit. Les crues et les hautes eaux d'hiver ont un effet nettoyant dans les mouilles. De l'automne 1998 à la fin du printemps 1999, le taux moyen de recouvrement par la fraction sableuse est passé de 48 % à 40 % dans les mouilles et de 25 % à 17 % pour les seuils. Il faut toutefois distinguer le tronçon de l'Aude du réservoir de Puyvalador à la confluence avec la Bruyante et le tronçon à l'aval du confluent.

A. L'Aude du réservoir de Puyvalador à la confluence de la Bruyante

À l'aval du barrage de Puyvalador, les vidanges et les chasses, en favorisant le dépôt de fines à fort contenu organique, ont contribué à façonner un lit non représentatif des milieux torrentiels montagnards ; il est emboîté dans le lit naturel, resserré par les banquettes herbeuses et ajusté aux débits artificialisés. Ce secteur est caractérisé par des variations de teneurs en métaux lourds liées à la lithologie et au jeu des petits affluents comme le Rec del Gué. Il semble marqué par une relative stabilité (la carrière de la Farga elle-même ne semble pas modifier le chimisme des alluvions), ce qui coïncide avec des versants boisés et l'absence de dénudation des pentes.

Dans les gorges du Carcanet, les dépôts de sable se distribuent entre des bancs latéraux formés par des sables issus de suspensions (effet des petites crues à écoulement turbulent) et un chenal sinueux et étroit caractérisé par le charriage du sable pour les faibles débits et parfois même pour le débit réservé. Ce tronçon montre une faible capacité d'autonettoyage dans la partie amont alors que des épisodes de faible fréquence et de faible durée peuvent être efficaces à partir d'Escouloubre. Les conditions hydrauliques ont permis le maintien de graviers et galets dans le lit mineur, mais leur transit est nul. Il est possible qu'ils favorisent même un colmatage du substrat et un recouvrement par le sable, ce qui explique la faible présence en surface des classes granulométriques représentant la charge de fond originelle. Les gorges sont caractérisées par une hausse des concentrations de certains métaux lourds, en particulier ceux pour le plomb et le baryum. Cette augmentation peut être imputée, d'une part, à des phénomènes de tri hydraulique à l'aval du secteur court-circuité par la prise d'eau d'Escouloubre et, d'autre part, à la fourniture d'arènes plus riches en éléments métalliques par l'érosion du batholite de la zone thermale qui s'étend des Bains d'Escouloubre à Usson.

B. L'Aude à l'aval de la Bruyante

La Bruyante récuré entièrement ce tronçon lors de ses crues. À l'exception des retenues, les débits de crue expulsent le sable qui se redépose de manière homogène dès la décrue et lors des petites montées d'eau ultérieures. Le sable est visible quasiment en permanence, mais il est sans doute renouvelé fréquemment. Le changement brutal des teneurs métalliques, qui se placent à des valeurs voisines de celles des alluvions de la Bruyante, indique que l'affluent fournit une part importante de la masse alluviale de l'Aude; la Bruyante semble être actuellement le principal fournisseur de matériel sédimentaire de la haute vallée. Dans les gorges de l'Aude, l'évolution des teneurs ne signale pas de contribution sédimentaire remarquable d'un des affluents secondaires. La contribution de l'Aguzou n'apparaît pas dans les varia-

tions des teneurs, soit par relative indigence de sa charge par rapport à la masse alluviale déjà charriée par l'Aude, soit par dépôt au confluent, la rupture de pente faisant brutalement décroître la compétence. L'essentiel du matériel sableux semble donc provenir des gorges granitiques de l'Aude et du bassin de la Bruyante.

Il semble cependant se manifester après la confluence de la Bruyante un déficit en graviers et galets. Il peut être dû à l'absence d'apports de charge de fond en provenance de l'Aude amont, du fait de la présence du réservoir de Puyvalador alors que les conditions hydrauliques favorisent une active mise en mouvement; il convient peut-être aussi d'attribuer une part de responsabilité à la réduction des apports en provenance du bassin de la Bruyante.

C. Evolution des sources de sédiments

Un tournant semble avoir été pris à partir des années 1970-1980 quand se sont superposées, à la déprise agricole, de nouvelles pratiques de gestion de l'espace. Les aménagements routiers, touristiques ou forestiers ont localement affecté la dynamique des versants. En outre, alors que la dynamique d'ensemble a été marquée par la reconquête végétale, des secteurs d'où les départs de matière peuvent être importants ont été fragilisés. Ainsi, alors que les versants calcaires se sont uniformément couverts de végétation, le manteau d'arène des croupes granitiques a souvent été entaillé par les aménagements. Ce constat fait, il faut néanmoins relativiser ce changement et admettre que l'érosion du bassin a pu être intense lors des périodes de mise en culture intensive au début du siècle.

On peut classer les espaces soumis à une nouvelle dynamique végétale et géomorphologique en quatre catégories. On trouve en premier lieu des espaces autrefois cultivés et peu à peu colonisés par la végétation (Mijanés, Escouloubre) et, ensuite, des espaces non spécifiquement agricoles, eux aussi marqués par la reconquête végétale (versant de rive droite de l'Aguzou). Des travaux de reboisement et la création de banquettes ont accéléré ce processus de végétalisation. On observe troisièmement certains versants dénudés et à forte pente qui demeurent le siège d'une érosion vigoureuse (bassin de la Bruyante, rive droite des gorges du Carcanet). Enfin, des travaux récents ont soumis des parties du bassin versant à l'érosion, comme les secteurs forestiers soumis à des coupes à blanc (Quérigut) ou au percement de routes forestières (Gesce); citons également les secteurs où l'élargissement ou la réfection de certaines routes ont remis au jour le manteau d'arène qui alimente en sédiments les petits ravins affluents de l'Aude.

V. CONCLUSION

À l'aval du barrage de Puyvalador, il semble qu'un équi-

libre artificiel existe entre les entrées et les départs de sable provenant des affluents puisque la morphologie du lit fluctue faiblement autour de valeurs moyennes. L'effet de chasse d'eau claire ne peut qu'être temporaire, la morphologie à bancs et chenal rétréci se reformant sans doute assez vite. Les conditions de cet équilibre se modifient progressivement vers l'aval, avec l'arrivée d'affluents drainant des sous-bassins plus importants, sans exclure les effets de déversements à l'aval d'Escouloubre. Les conditions hydrauliques qui permettraient une réduction significative et permanente du recouvrement sableux dans les gorges du Carcanet n'ont pas été recherchées dans cette étude, mais elles seraient susceptibles de requérir des débits importants et une fréquence relativement forte. Si elles devaient être réalisées, elles devraient mobiliser des débits inférieurs au seuil de mise en mouvement des graviers et galets dont le stock n'est pas renouvelable.

À l'aval du confluent de la Bruyante, les observations montrent que l'ensablement est assez hétérogène. Exception faite des prises d'eau, qui piègent le sable, le lit de l'Aude est nettoyé par les débits de crue provenant du bassin de la Bruyante. Les dépôts sableux se reforment rapidement, car le lit conserve sa géométrie naturelle et donc les conditions de leur dépôt lorsque la turbulence se réduit. L'artificialisation du régime hydrologique par les aménagements hydroélectriques permet encore l'occurrence de débits de crue capables de nettoyer le lit. La question est donc celle du dépôt de sable entre les crues, naturelles ou artificielles.

Toutes les mesures permettant de réduire l'érosion superficielle et les quantités de sable apportées aux cours d'eau seraient bénéfiques. La suppression des manifestations de l'érosion n'est pas possible, mais leur minimisation peut faire partie d'une pratique de gestion saine à l'échelle du bassin, notamment dans les sous-bassins tributaires des gorges du Carcanet. Il s'agirait de contrôler les pratiques forestières de manière à réduire les coupes à blanc sur les terrains en pente, à contrôler les linéaires de pistes forestières en déblai-remblai, à minimiser les interventions le long des routes de manière à réduire l'érosion des talus en déblais et, enfin, d'améliorer les conditions du traitement et de la mise en décharge des fines de lavage dans les carrières de la région.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre des études du Groupe Haute Vallée de l'Aude piloté par EDF-Production Transport (Energie Languedoc-Roussillon). Les auteurs remercient le personnel du Groupe d'Exploitation Hydraulique d'Axat pour l'aide matérielle fournie sur le terrain ainsi que Cyriaque-Rufin Nguimalet pour sa contribution aux analyses granulométriques réalisées au Laboratoire de Géographie Physique Pierre Birot de Meudon

(UMR 8591 du CNRS). Les mesures des concentrations en métaux lourds des sédiments ont été réalisées à l'Université Montpellier II. Une partie de la documentation a été obtenue aux Archives Départementales de l'Aude et à l'Institut Géographique National.

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDER G.R. & HANSEN E.A., 1986. Sand bed Joad in a brook trout stream. *North American Journal of Fisheries Management*, 6, 9-23.
- ASTRADE L. & BRAVARD J-P., 1999. Energy gradient and geomorphological processes along a river influenced by neotectonics (the Saône river, France). *Geodinamica Acta*, 12 (1), 1-10.
- BRAVARD J-P., 1983. Les sédiments fins des plaines d'inondation dans la vallée du Haut-Rhône. *Revue de Géographie Alpine*, 4, 363-379.
- BRAVARD J-P., ASTRADE L., JACOB N. & ALVAREZ C., 1999. *Haute Vallée de l'Aude : étude géomorphologique et sédimentologique*, Direction Régionale de l'Environnement Languedoc-Roussillon, EDF Production Transport Energie Languedoc-Roussillon, Rapport final, 62 p. + annexes.
- CAMBON C., 1994. *Étude hydrologique de la haute vallée de l'Aude*, CSP-Délégation régionale Languedoc-Roussillon, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, Rapport dactylographié, 26 p. + annexes.
- DIREN, 1998. *Suivi hydrologique de l'année 1997*, DIREN Languedoc-Roussillon, Rapport dactylographié, non paginé.
- DIREN, 1999. *Suivi hydrologique de l'année 1998*, DIREN Languedoc-Roussillon, Rapport dactylographié, non paginé.
- DULAC K. & LENTILLON J-P., 1995. *Vidange de Puyvalador; suivi des phénomènes de sédimentation à l'aval du barrage*, Conseil Supérieur de la Pêche, Délégation régionale Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côtes d'Azur, Corse, Rapport final, 36 p.
- EDF/DTG, 1995. *Compte-rendu du suivi physico-chimique de la vidange de Puyvalador sur l'Aude*, Juin 1995, Rapport dactylographié, 6 p. + annexes.
- EDOUARD J-L. & VIVIAN H., 1984. Une hydrologie naturelle dans les Alpes du Nord. Les nouveaux paramètres de l'hydrologie alpine : les aménagements hydroélectriques. *Revue de Géographie Alpine*, 2-3, 165-188.
- GROUPE DE TRAVAIL HAUTE VALLEE DE L'AUDE, 1998. *Synthèse des études de la haute vallée de l'Aude de 1994 à 1997*, Rapport dactylographié, 34 p. + annexes.
- HENDRICKX F., 1996. *Transport sédimentaire en haute vallée de l'Aude, utilisation de chasses hydrauliques dans la sauvegarde d'un substrat de qualité pour la fraie de la Truite commune (Salmo trutta)*, Mémoire ENGREF & INP ENSEEIHT, Toulouse, 37 p. + annexes.
- JACOB N., ASTRADE L., BRAVARD J-P. & ALVAREZ C., 2000. Exploitation des ressources naturelles et problèmes environnementaux : le cas du bassin de la Haute Vallée de l'Aude. *Actes des Journées Hydrologiques de la Commission u Hydrosystèmes continentaux*, septembre 1999, Presses Universitaires de Perpignan, 10 p.
- KLINGEMAN P.C., BRAVARD J-P. & GIULIANI Y., 1994. Les impacts morphodynamiques sur un cours d'eau soumis à un aménagement hydroélectrique à dérivation : le Rhône en Chautagne (France). *Revue de Géographie de Lyon*, 69(1), 73-89.
- LAGASQUIE J.-J., 1984. *Géomorphologie des granites : les massifs granitiques de la moitié orientale des Pyrénées françaises*, éd. du CNRS, Paris, 374 p.
- LENTILLON J-P., VESSIOT B. & BARIL, D., 1996. *Principales prises d'eau dans le département de l'Aude*, Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, Conseil Supérieur de la Pêche, 140 p.
- MACKLIN M-G. & KLIMEK K., 1992. Dispersal storage and transformation of metal-contaminated alluvium in the upper Vistula basin. *Applied Geography*, 12, 7-30.
- MARNÉZY A., 1999. *L'Arc et sa vallée : anthropisation et géodynamique d'une rivière alpine dans son bassin versant*, Thèse de géographie, Université Joseph Fourier, 682 p. + annexes.
- MERCIER A., 1999. *L'anthropisation d'un système fluvial à haute énergie : l'exemple de l'Ariège (Pyrénées Centrales Françaises)*, Thèse de géographie, Université de Limoges, 373 p.
- MILHOUS R.T., 1982. Effect of sediment transport and flow regulation on the ecology of gravel-bed rivers. *Gravel-bed Rivers. Fluvial processes, engineering and Management* (R.D. Hey, J.C. Bathurst, C.R. Thorne Eds), J. Wiley & Sons, Chichester, 819-842.
- PASSEGA R., 1964. Grain-size representation by CM patterns as a geological tool. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34 (4), 830-847.
- PEIRY J-L., 1988. *Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments, l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie)*, Thèse de géographie et aménagement, Université Lyon 3, 378 p.
- PEIRY J-L. & VIVIAN H., 1994. Dynamique des crues et réduction de la capacité du chenal consécutive à la construction d'un barrage hydroélectrique : l'exemple du Drac inférieur à l'amont de Grenoble. *Congrès « Crues et Inondations », Nîmes 14-16/9/94, XXIIIèmes. Journées de l'Hydraulique*, Publ. Société Hydrotechnique de France, Paris, 321-329.
- SALADIN V., 1994. *Etude morphodynamique de la haute vallée de l'Aude*, CSP-Délégation régionale Languedoc-Roussillon, Rapport dactylographié, non paginé.
- SOCIETE D'INGENIERIE POUR L'EAU ET L'ENVIRONNEMENT, 1992. *Schéma de restauration et d'entretien du fleuve Aude (1992)*, Conseil Général de l'Aude, Tome I, 104 p.
- VIVIAN H., 1986. Un exemple de régime influencé : hydrologie et hydroélectricité dans les cours d'eau des Alpes du Nord. *Hydrologie Continentale*, 1, 63-68.
- WOLFENDEN P-J. & LEWIN J., 1978. Distribution of metal pollutants in active stream sediments. *Catena*, 5, 67-78.

Adresses des auteurs :

Laurent ASTRADE
UMR 5600 « Environnement, Ville, Société »
18 rue de Chevreul
F-69007 Lyon

Nicolas JACOB
Université Sorbonne-Paris 4
191 rue St-Jacques
F-75005 Paris et UMR 8591

Jean-Paul BRAVARD
Université Lumière-Lyon 2
5 av. P. Mendès France
F-69676 Bron Cedex et UMR 8591

Caroline ALVAREZ
Université Sorbonne-Paris 4
F-191 rue St-Jacques
75005 Paris et UMR 8591