

Mesures des transports solides en suspension dans la Durance sur cent-cinquante ans (1857-2007) : liaisons avec les opérations de restauration écologique intervenues à l'échelle du bassin versant et de la rivière

Alain Poirel

L'objectif de cet article est de faire un bilan sur les données de transport solide en suspension (TSS) disponibles dans le bassin versant de la Durance, en tentant de mettre en perspective à la fois la motivation et la perception du phénomène qu'ont eues les auteurs aux différentes époques. Ensuite, les évolutions de ce transport solide sont analysées pour éclairer l'état actuel et tenter de percevoir les évolutions futures dans un contexte changeant (végétalisation des bassins, occupation de l'espace alluvial, évolutions « climatiques », modifications des usages de l'eau...).

Historique des problématiques conduisant aux études de transport solide en suspension

L'érosion des bassins versants affecte l'agriculture

Très tôt, dès la fin du XVIII^e siècle, les effets de la déforestation sur le TSS se font ressentir : « ... tout ce qui pouvait servir à un champ ou à une vigne devint la victime soit de la dent de la chèvre soit de la hache et de la pioche des habitants. N'étant plus retenues par les arbres et les plantes, les pluies qui tombent ici comme des torrents, se précipitèrent, entraînant les terres et les pierres détachées des rochers ; les ravins s'accrurent, sillonnèrent la contrée et abaissèrent les plateaux... » (Ladouette, 1834).

Plus en aval, les limons de la Durance étaient « récupérés avec soin » dans des suites de trous appelés « *nay* » dans lesquels les limons ou « *nites* » se déposent. Seulement deux ou trois récoltes par an de ce matériau « *d'autant plus abondant que les orages ont été plus fréquents durant l'été* » sont autorisées ; « *admise dans une terre à blé... la nite est parvenue à porter un rendement de 4 pour 1 à un rendement de 12 pour 1* » (Boussingault, 1851).

Des interventions lourdes sont tentées pour regagner des terres sur la rivière

L'encaissement des rivières est reconnu comme un outil à appliquer sur toutes les rivières des Alpes (Dugied, 1819). Il s'agit de favoriser l'enlèvement et l'exhaussement de terrains gagnés sur la zone de mobilité latérale par un système d'épis latéraux dont le but est de « *favoriser l'encaissement des rivières* », épis confortés par « *une levée en gravier sur laquelle on pique de jeunes plants d'osier, d'aunes de peupliers et de saules* » (Fiard, 1831). Mais ces techniques font débat dans la littérature : « *Ce n'est qu'avec beaucoup de circonspection qu'on doit changer le cours d'une rivière parce que les résultats sont incertains* » (Minard, 1851). Il se dégage un consensus scientifique pour dire que les « *digues insubmersibles sont un leurre* » et qu'elles « *privent les vallées de ce limon généralement très fécond que déposent les crues* » (Dausse, 1856).

Les contacts

EDF-DTG, Électricité de France – Direction technique générale, BP 41, 38040 Grenoble Cedex 9

Le déboisement est identifié comme source de tous les problèmes

En relation avec les grandes crues de la fin du XVIII^e siècle, les impacts anthropiques sur les bassins versants sont étudiés de même que leurs effets sur les précipitations locales. L'ordonnance de 1667 et la loi du 9 Floréal An XI (1803) proscrivent le défrichement des terrains ou le déboisement des secteurs en pente.

Ce point fait débat, certains estimant que le fait de reboiser les montagnes va diminuer le débit des sources et limiter les précipitations sur les montagnes (Le Creux, 1804). Des actions sont envisagées : arrêt des « défrichements sur le flanc des montagnes », « boisement des montagnes » considéré comme le « principal moyen de rétablir les climats et de mettre un frein aux ravages des eaux », « encaissement des torrents » considéré comme le complément de l'opération précédente (Dugied, 1819). Le conflit d'usage entre l'agriculture et la forêt limitant les risques d'inondations perdure jusqu'à la loi sur la restauration et la conservation des terrains de montagnes (Ponchelet, 1995).

Le transport solide envase les ouvrages hydrauliques

À partir de 1910, la gestion de la ressource en eau *via* son stockage dans des retenues devient indispensable pour l'agriculture et l'énergie. Les études passent progressivement de l'Administration des améliorations agricoles aux services des Forces hydrauliques. Une étude sur vingt-cinq stations de mesures des Alpes et des Pyrénées (Müntz *et al.*, 1913, 1915) aboutit à la conclusion « qu'il ne faut entreprendre qu'avec une extrême prudence, sur certains cours d'eau des Alpes, la construction de barrages réservoirs, dont un envasement rapide est à craindre ». Dès 1924, les Forces hydrauliques du sud-est s'orientent résolument sur les problématiques d'envasement et d'engrèvement des retenues (Haegelen, 1927) qui sont très clairement identifiées comme deux risques majeurs pour le volume des retenues (Pardé, 1950).

Malgré cela, dans les années 1950, l'envasement de certaines retenues pose de sérieuses difficultés d'exploitation, notamment au niveau des ouvrages de fond (Remenieras, 1951). La perspective de nouveaux grands aménagements déclenche de nouvelles études sous l'égide d'EDF (Bonnin, 1952).

Les sédiments fins sont sources d'impacts écologiques

Dans les années quatre-vingt-dix, l'envasement des retenues, « la sédimentation et la perte de capacité de stockage qui en résultera à long terme suscitent une vive inquiétude partout dans le monde » (World Commission of Dam, 2000). Le sédiment fin devient aussi le support des polluants, un agent du colmatage des bancs de graviers, de la végétalisation et de la fixation de ces mêmes bancs, un agent du colmatage des substrats et des frayères... « C'est une des préoccupations majeures actuellement rencontrées par l'ensemble des acteurs : les dépôts de limons et leur incidence sur l'économie générale de la Durance, son potentiel écologique et l'accroissement du risque d'inondation qu'ils engendrent » (Balland *et al.*, 2002).

Très récemment, le rôle de ces sédiments dans l'accrétion des deltas fluviaux (EuroSION, 2004) et comme support des chaînes trophiques dans les écosystèmes marins (Darnaude, 2003) font que leur déficit est aussi considéré comme un impact majeur. Ce point prend d'autant plus d'importance que « le niveau moyen des mers s'est élevé au XX^e siècle de 1 à 2 millimètres par an... » (GIEC¹, 2001).

La mesure des limons et des matières en suspension en Durance de 1857 à 2007

Les concentrations et flux de TSS estimés sont donnés sur la figure 2.

Les limons entraînés par les fleuves : la richesse perdue

Dès le milieu du XIX^e siècle, de nombreux auteurs se sont donc attaqués à la mesure du transport solide en suspension. Très tôt, la Durance est étudiée au travers de trois séries d'observations :

– la série des Ponts et Chaussées de 1857-1858 donne les concentrations et hauteurs d'eaux relevées en deux points de la Durance amont, Serre-Ponçon et Tallard ;

– les « Expériences menées sur les Limons » (Mangon, 1869) sur la Durance à Mérindol fournissent une première estimation des flux de TSS à 17,7 Mt. Si ces données permettent le premier calcul des flux sur la Durance, les débits utilisés dans ce calcul semblent élevés (débit moyen annuel de 380 m³/s) ;

1. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

– les mesures réalisées de 1868 à 1889 sont relatées de manière synthétique par plusieurs auteurs (Imbeaux, 1892 ; Barges, 1963, *in* Allary, 1998). Les flux annuels sont estimés à 3,9 Mt à Serre-Ponçon (Pont de l'Archidiacre ?) et à 6,7 Mt à Pont Mirabeau (Baldy, 1973). À cette époque, le limon est une richesse donnant lieu à d'importantes recherches (Chapentier de Cossigny, 1889) et des mesures agronomiques sont toujours réalisées en complément des concentrations.

Le dimensionnement des barrages et des retenues en fonction du transport solide

Les études de transport solide antérieures à 1950 sont menées par les services de l'État et sont concentrées sur les régions de montagne, là où l'usage énergétique est possible.

La série de 1911-1913 comprend un bilan amont/aval sur plusieurs rivières alpines ou pyrénéennes, dont la Durance, où les valeurs paraissent peu cohérentes entre les deux points de mesures par rapport aux flux importants des affluents intermédiaires que sont la Bléone, le Sasse et l'Asse (Müntz *et al.*, 1915).

Même si les données de la Durance à Oraison (1924-1925) ne paraissent pas nous être parvenues, cette étude des Forces hydrauliques marque un premier tournant avec un objectif exclusivement orienté vers l'envasement des retenues alpines (Haegelen, 1927).

Il faut ensuite attendre 1951 pour disposer de mesures réalisées par EDF au Pont de l'Archidiacre et Pont Mirabeau. Exprimée en matières décantables sur les cahiers originaux, cette série a été convertie en tonnages avec des coefficients surprenants allant de 1 à 2,6 selon les auteurs qui les utilisent.

Avec l'aménagement de la Durance, le contrôle des débits solides devient réglementaire. Des mesures densimétriques sont réalisées à l'usine de Jouques depuis 1994.

De 1987 à 1990, une série, initiée par EDF dans le cadre d'étude sur le bassin de décantation de Cadarache, a été réalisée à partir de prélèvements journaliers par préleveur automatique à la fois dans le canal et dans la Durance au droit de Beaumont (Miquel *et al.*, 1992).

La montée des préoccupations environnementales

Les réseaux des données sur l'eau pilotés par les agences se traduisent par des mesures de TSS à pas de temps mensuel, mais l'absence de suivis spécifiques en crue ne permet guère d'en déduire des flux. Par contre, ces mesures donnent les gammes de concentrations courantes sur de nombreux points. Plus spécifiques, des études sur les flux de sédiments fins voient le jour en 2001 afin de préciser la gestion environnementale du TSS dans les retenues et canaux de la Durance avec une optique de gestion à long terme. La notion d'état cible associée est destinée à définir les états acceptables et, lorsqu'ils sont atteints ou dépassés, les actions les plus pertinentes à mettre en œuvre pour y revenir (en général pour limiter les risques d'inondations tout en respectant différentes contraintes environnementales).

Le tableau 1 fait le bilan des séries disponibles (à notre connaissance) sur la Durance.

Le graphique de la figure 1 donne les concentrations mesurées à différentes époques, avec différentes méthodes et dans différentes configurations du bassin de la Durance. Il se dessine une décroissance nette des concentrations au fil du temps à prendre avec précaution compte tenu des différences de méthodes.

Néanmoins, les concentrations moyennes restent très élevées et les valeurs maximales observées pour chaque série dépassent fréquemment les 10 g/L. En encadré noir, les principales séries de mesures homogènes sur plusieurs sites. La boîte représente les quantiles 25 et 75 %, les barres horizontales représentent les quantiles 10 et 90 %, le point « central » la médiane et les points noirs/gris représentent les valeurs extrêmes.

Évolution des facteurs influençant le TSS sur cent-cinquante ans

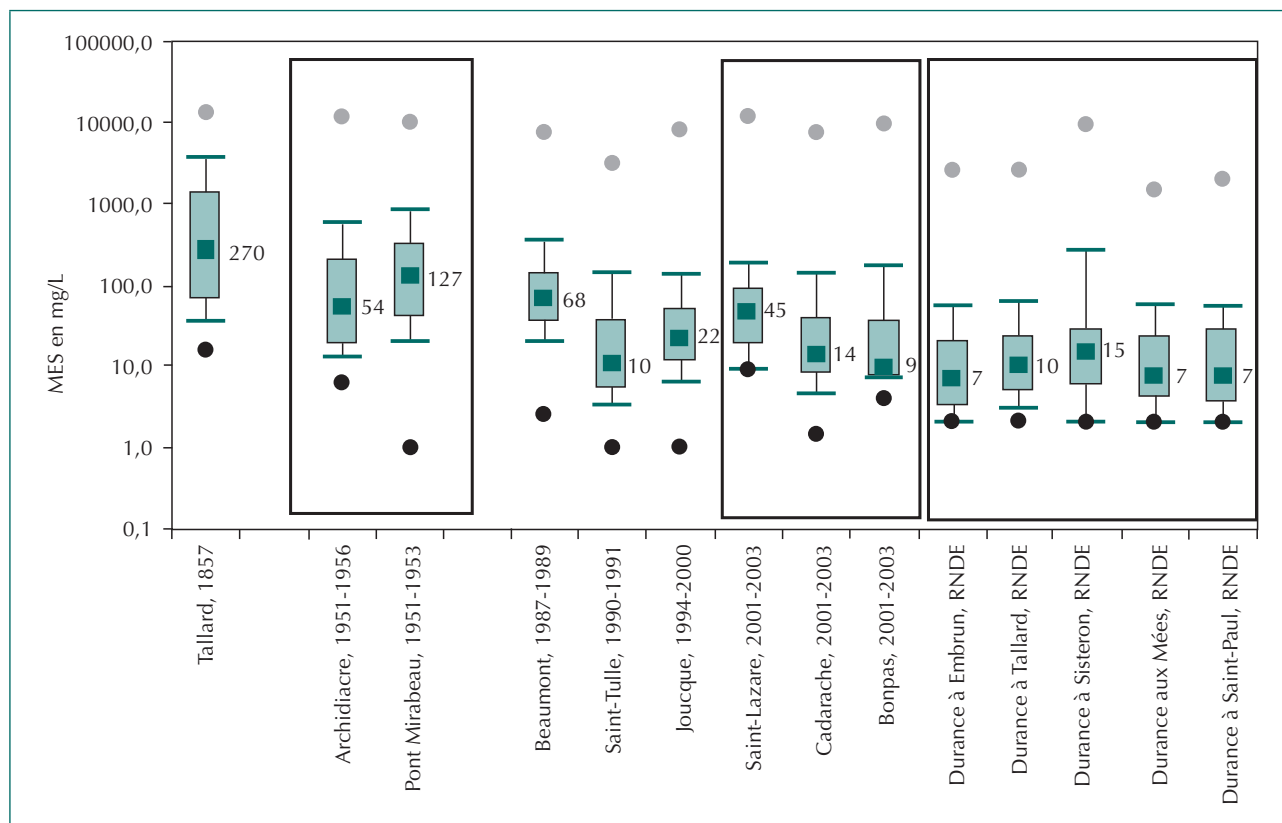
Plusieurs facteurs sont susceptibles d'avoir eu des impacts notables sur les processus générateurs du TSS. On distinguera les processus hydroclimatiques d'une part et les processus géomorphologiques et/ou d'occupation des sols d'autre part. Si l'effet de chaque processus est bien connu, le sens des variations induites n'est pas toujours très simple à estimer car il existe de nombreuses interactions entre tous les paramètres (température et altitude limite de la végétation, température et couverture neigeuse, végétation et écoulements...).

▼ Tableau 1 – Bilan des séries disponibles sur la Durance.

Dates	Lieu	Concentrations	Méthode de mesure	Débits	Calcul des flux	Archives	Auteur
1857-1858	Tallard et Serre Ponçon	Événementielles en crue	Échantillon de 3 litres, filtration séchage, pesée	Hauteurs mais pas de débits	Pas de calcul	Mesures de base	Pont et Chaussées
1859-1860	Mérindol	Intégrées sur un mois	Agrégation par mois, décantation, séchage, pesée du décantat	Débits de Pont Mirabeau douteux	Concentration moyenne mensuelle x débit moyen mensuel	Rapport avec un tableau agrégé, mais hypothèses clairement précisées	H. Mangon
1868-1889/84 ?	Pont de l'Archidiacre et Pont Mirabeau	?	?	Stations de l'Archidiacre et Pont Mirabeau douteux	?	Agrégées sur toute la période (publications)	Attribuées à Imbeaux
1911-1913	Embrun Sisteron et Pont Mirabeau	2 fois par mois + en crue	Filtration, séchage, pesée	? ; Station de Pont Mirabeau	?	Agrégées et assez peu détaillées	A. Muntz, E. Lainé
1924-1925	Oraison	? plusieurs mesures certains jours	?	?	?	Agrégées et très peu détaillées	Forces hydrauliques
1951-1956	Pont de l'Archidiacre et Pont Mirabeau	Intégrées proportionnellement au débit sur 1 jour	Matières décantables en cm ³ /litre, doute sur les coefficients de passages de m ³ en tonnes	Stations de l'Archidiacre et Pont Mirabeau avec jaugeages	Concentration volumique proportionnelle au débit x débit journalier	Cahiers d'observations (sauf Mirabeau de 1954 à 1956)	EDF-RE Alpes
1983-2006	Nombreux points	Prélèvement mensuel instantané	Filtration, séchage, pesée de 1 litre	Stations hydrométriques ?	Pas de calcul	Base de données du RNDE ²	Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse
1987-1990	Beaumont Durance et Beaumont canal	Prélèvement automatique journalier puis hebdomadaire (intégré par jour)	Filtration, séchage, pesée de 1 litre	Débits turbinés sur le canal ; débits aménagement pour la Durance	Concentration journalière x débit moyen journalier	Base de données EDF	EDF/ Recherche et Développement
1990-1991	Sainte Tulle (points amont et aval Asse)	Prélèvement automatique tous les 3 jours environ	Filtration, séchage, pesée de 1 litre ?	Débits au droit de la digue fusible par jaugeages	Pas de calcul	Base de données EDF	SCP ³ pour EDF
1994-2000	Jouques et Saint Chamas	Mesures en continu par densimètre + MES	Densimétrie très peu précise en dessous de 1 g/L	Débits turbinés à Jouques	Concentration journalière x débit moyen journalier	Base de données EDF	EDF-Exploitant
2001-2003	Saint Lazare, Cadarache, Bonpas	Mesures en continu par turbidimètre + MES	Étalonnage d'une loi turbidité/MES	Débits usines journaliers ou horaires	Concentration horaire x débit horaire en crue	Base de données EDF	EDF-DTG
2004-2006	Cadarache, Jouques, Mallemort, Bonpas	Mesures en continu par turbidimètre + MES	Étalonnage d'une loi turbidité/MES	Débits usines journaliers ou horaires	Concentration horaire x débit horaire	Base de données EDF	EDF-DTG

2. Réseau national des données sur l'eau.

3. Société du Canal de Provence.



▲ Figure 1 – Évolution des concentrations en fonction des séries de mesures.

Les paramètres hydroclimatiques et le TSS sont mesurés depuis cent-cinquante ans environ

Les chroniques des moyennes annuelles de pluie, température de l'air, débit et TSS apparaissent sur la figure 2.

Les différents paramètres hydroclimatiques présentent des tendances plus ou moins marquées

Les tendances interannuelles par paramètre sont présentées sur les figures 3, 4 et 5.

ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DE L'AIR

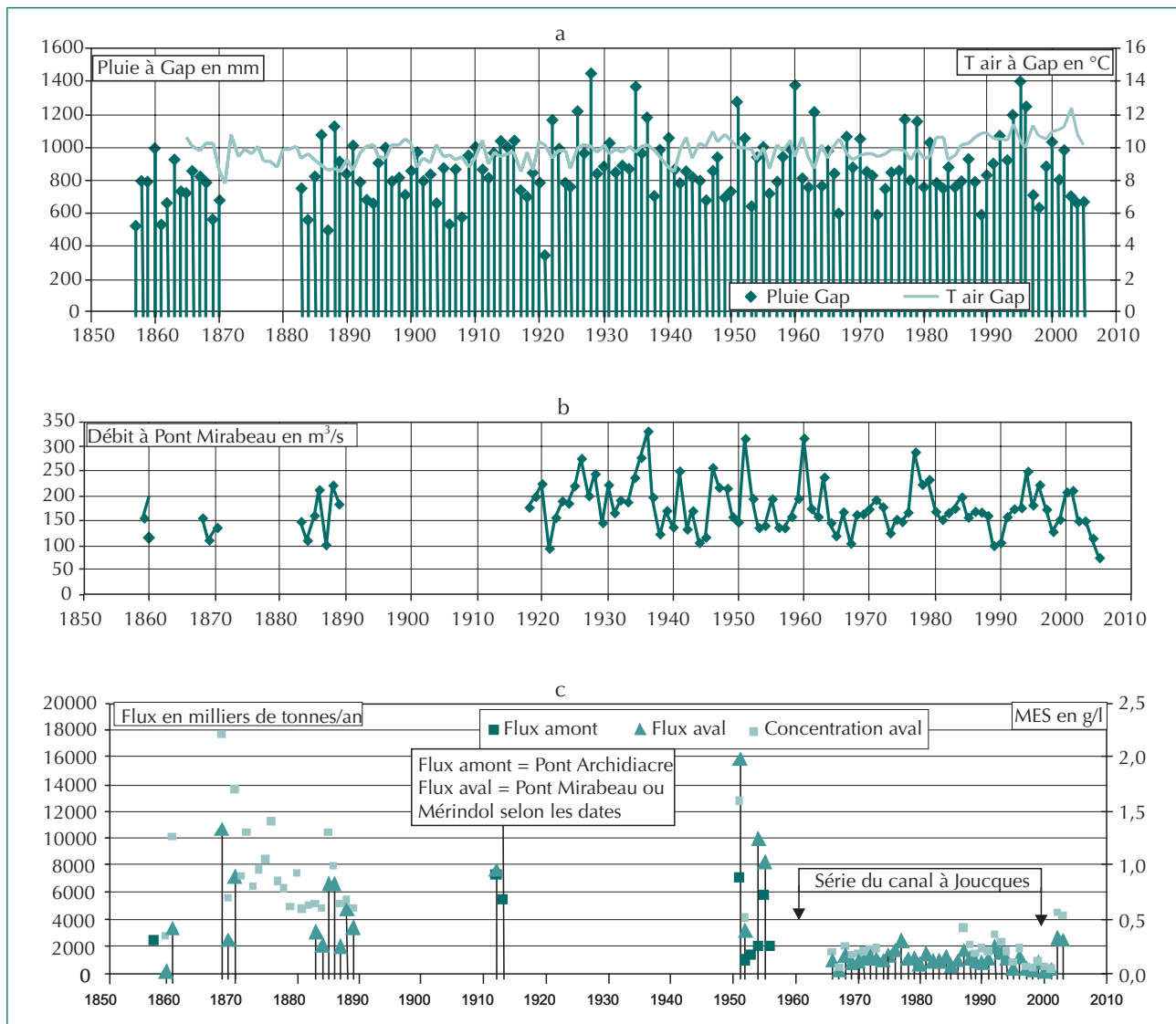
Sur plus de cent ans ou sur la période récente, quel que soit le mois, on observe une dérive positive de la température de l'air. Celle-ci s'établit à 0,01 °C par an sur la plus longue période. La tendance est beaucoup plus marquée depuis 1970 (en partant d'une décennie froide pour aller vers la plus chaude observée). Il est bien difficile de trouver une saisonna-

lité marquée dans ces évolutions même si le premier semestre apparaît plus chaud sur la période récente.

La hausse des températures a une incidence très complexe sur le TSS au travers de la répartition pluie/neige et de la fonte des neiges, des effets sur la végétation et des phénomènes de maturation des terrains...

ÉVOLUTION DES PLUIES MOYENNES

Sur les pluies à Gap, la tendance est beaucoup moins nette, que ce soit sur une longue période ou depuis 1970, on n'observe pas de différence significative du cumul annuel. Par contre, depuis 1970, on assiste à une modification significative entre le premier semestre où seul le mois d'avril présente une évolution positive et le second semestre où tous les mois ont une tendance positive, décembre excepté. Les tendances sur les pluies maximales annuelles sont faiblement significatives mais, au niveau mensuel, on observe la même évolution que pour les cumuls.



▲ Figure 2 – Chroniques annuelles des températures de l'air, pluies, débits, concentrations et TSS de 1850 à 2005.

Couplées à la température, ces évolutions saisonnières peuvent également avoir des incidences sur le TSS via la végétation, la maturation des terrains et l'énergie érosive des pluies.

ÉVOLUTION DES DÉBITS « NATURELS »

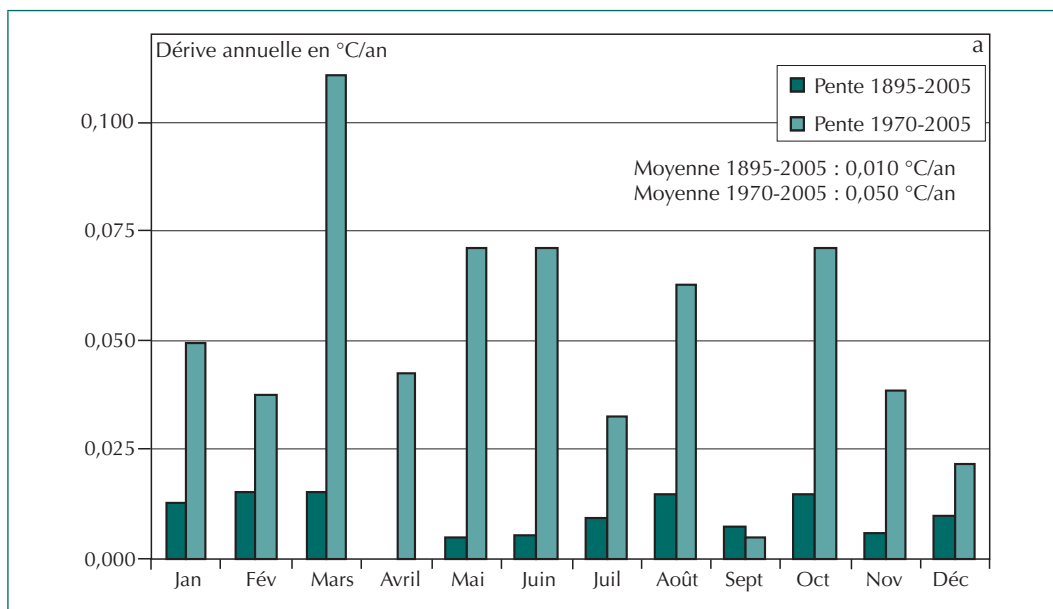
Bien qu'il soit toujours délicat d'estimer des tendances sur une série reconstituée issue de plusieurs séries de débits de différente nature, il semble que la tendance annuelle soit plutôt à une réduction des flux liquides. Depuis 1970, avec des méthodes de calculs comparables, l'ampleur et la saisonnalité des évolutions est plus nette. Seuls les mois d'octobre à janvier présentent une tendance positive alors que

tous les autres mois présentent une tendance négative.

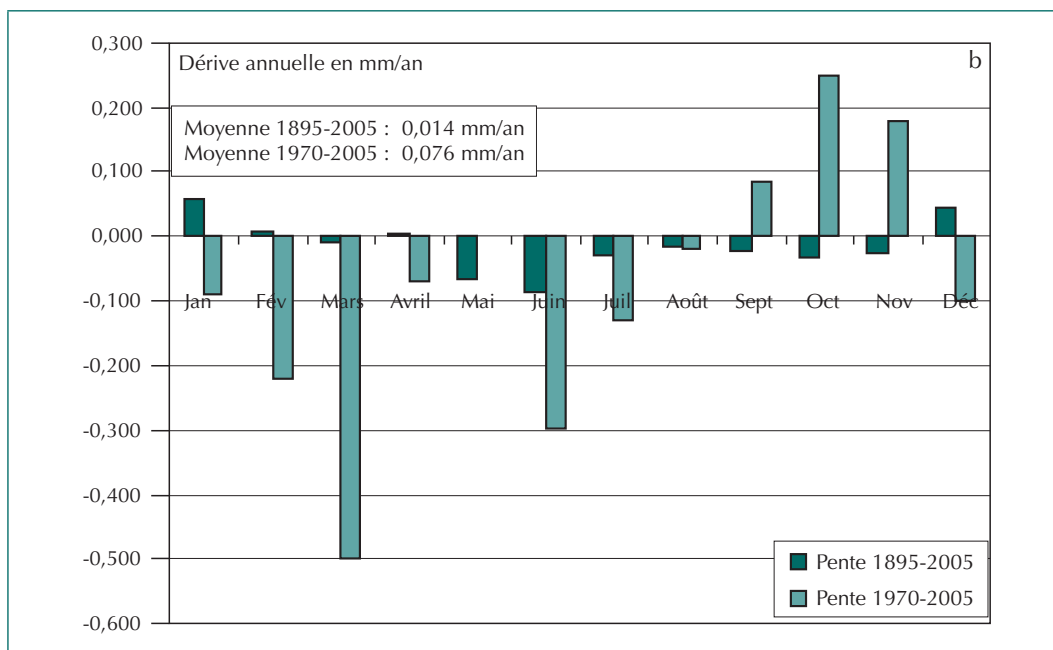
Les effets possibles sur les concentrations sont difficiles à estimer, mais la réduction du débit entraîne généralement une réduction en parallèle du flux solide.

L'occupation des sols et particulièrement la couverture forestière est profondément modifiée

Ces cent-cinquante dernières années, la surface forestière a été multipliée par trois en France, pour atteindre aujourd'hui environ 40 % du territoire national.



▲ Figure 3 – Tendence interannuelle (pente de droite) de chaque mois sur la longue série homogénéisée de température de l'air à Gap.

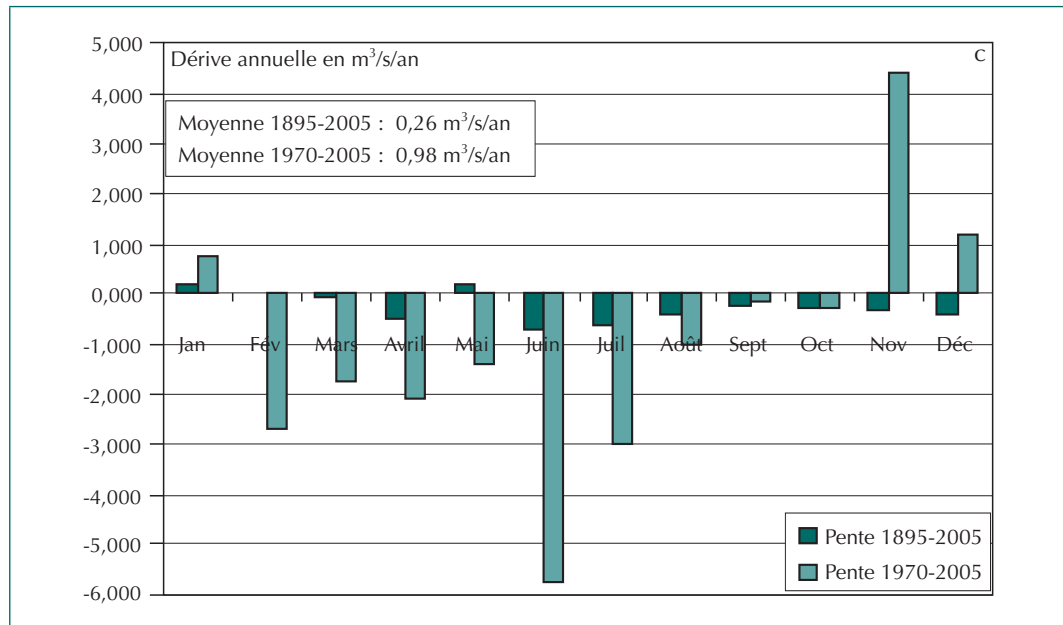


▲ Figure 4 – Tendence interannuelle (pente de droite) des maxima mensuels sur la longue série de pluie à Gap.

Avant 1948, cette augmentation est essentiellement due aux travaux de reboisement des montagnes (260 000 ha) (Vallauri *et al.*, 1997). Ils sont l'œuvre des services de Restauration des terrains en montagne (RTM), créés suite aux inon-

dations importantes et dévastatrices des grands fleuves français de 1845 à 1859. Ainsi, suite aux lois de 1860 sur le reboisement des montagnes, de 1864 sur le gazonnement et de 1882 sur la restauration et la conservation des terrains en

► Figure 5 – Tendence interannuelle (pente de droite) de chaque mois sur la longue série de débit à Pont Mirabeau (naturelle reconstituée à partir de Cadarache depuis 1944).



montagne, ces services ont vu le jour avec pour mission d'« assurer la sécurité des biens et des personnes contre les risques inhérents à la vie en montagne » (Combes, 1989), ou encore d'« aménager l'espace montagnard en vue de minimiser les risques naturels » (De Crecy, 1982). Au total, les services RTM ont replanté du pin noir d'Autriche sur près de 48 000 ha dans le sud-est de la France (photos 1 et 2). En Haute-Provence, ce sont plus de 15 000 ha de pineraies noires qui ont été installés artificiellement en forêt domaniale ; les chiffres sont de 10 000 ha pour la Drôme et de 4 000 ha pour les Hautes-Alpes.

Ces pins noirs dépérissent aujourd'hui et leur renouvellement doit être envisagé (Rey *et al.*,

2006). On observe très souvent le développement d'espèces post-pionnières qui annoncent une recolonisation naturelle du milieu par la végétation, celle-ci devant mener à long terme à des stades matures, principalement forestiers (essentiellement la chênaie pubescente et la hêtraie). La protection contre l'érosion devrait ainsi être pérennisée, avec un accompagnement minimal de l'évolution des peuplements forestiers.

Après 1948, on assiste surtout à des processus ponctuels de recolonisation naturelle des terrains dégradés. Ainsi, dans les Baronnies, on observe une tendance nette à la stabilité de l'occupation du sol sur deux tiers des surfaces (Cohen et Rey, 2005). Sur un quart des surfaces, la végétation



▲ Photo 1 – Bassin versant du Brusquet en 1887 (source : RTM, 1857).



▲ Photo 2 – Bassin versant du Brusquet en 2007 (source : Daniel Vallauri).

s'est densifiée. En particulier, 17 % des landes et pelouses de 1948 sont spontanément devenues des forêts en 1991. Cinq pour cent ont de nouveau été plantées en pins noirs dans les forêts domaniales. La régression de la couverture végétale est un phénomène marginal largement lié à des remises en cultures de landes et pelouses en bas de versant. La reconquête spontanée de la végétation concerne des surfaces comparables sur substrats marneux (25 %). Le poids des plantations est certes non négligeable dans cette progression.

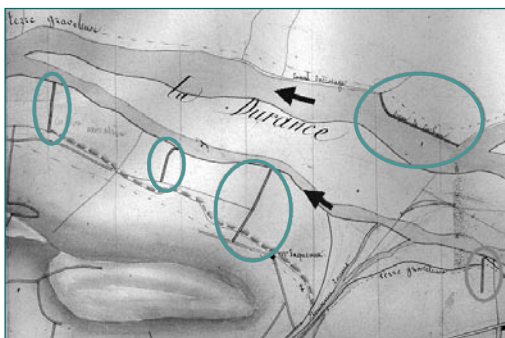
Dans les Préalpes de Digne, des études ont montré que par endroit, dans des bassins versants autrefois reboisés (bassin versant du Brusquet), la couverture végétale est restée stable entre 1948 et 1995 (Vallauri *et al.* 1997). Ailleurs, dans des bassins versants reboisés plus tardivement (bassin versant du Saignon à La Motte du Caire), la couverture végétale est restée stable sur 46 % des surfaces ; 49 % ont progressé (dont 14 % par plantation) et 5 % ont régressé. Sur des bassins non reboisés (bassin versant du Laval à Draix), la couverture végétale est restée stable sur 62 % de la surface, a progressé spontanément sur 35 % et a régressé sur 3 %.

Une conséquence de cette augmentation sur cent-cinquante ans de la couverture végétale est la diminution de production sédimentaire des bassins versants. Sur les dispositifs expérimentaux de Draix en terrains marneux des Alpes du Sud, on observe une production spécifique annuelle de sédiments deux-cent-vingt fois moins importante dans le bassin du Brusquet végétalisé à 87 % que dans celui du Laval végétalisé à 32 % (Richard et Mathys, 1999). Dans certains bassins, la réduction drastique de recharge sédimentaire a pu conduire à des phénomènes problématiques de creusement du lit des rivières (Drôme, Loire...) – Liébault *et al.*, 2000. Mais, dans le bassin de la Durance, l'érosion reste globalement importante, entraînant une surcharge solide dans la rivière et d'importants dépôts de sédiments à l'aval (Balland *et al.*, 2002). Cela se traduit aujourd'hui par un exhaussement du lit de la basse Durance et une augmentation du risque d'inondation.

L'espace fluvial et son usage se modifient au fil du temps

DES TRAVAUX D'ENCAISSEMENT DE LA RIVIÈRE PERMETTENT DE REGAGNER DES TERRES

L'encaissement des rivières est un des moyens mis en œuvre au XIX^e siècle pour tenter de regagner des terres agricoles sur le lit des rivières (figure 6).



◀ Figure 6 – Travaux d'encaissement de la rivière (source : Ponts et Chaussées, 1857).

De tels aménagements sont mis en place sur la Durance au niveau de la Saulce. En 1834, le gain aurait été de 99 ha de terrains sur 2 200 m de Durance soit une réduction moyenne de 450 m de largeur du lit. Cela valut à M. Fiard deux médailles d'or de Monsieur le Ministre (Ladoucette, 1834)... Les digues réalisées sont toujours visibles après la crue de 1856 même si elles ont dû être réparées à plusieurs reprises. L'espace gagné sur le lit majeur de la rivière semble devoir le rester... (cartes des Ponts et Chaussées de 1857).

DIFFÉRENTS USAGES ANTHROPIQUES CONTRIBUENT À RÉDUIRE L'ESPACE FLUVIAL

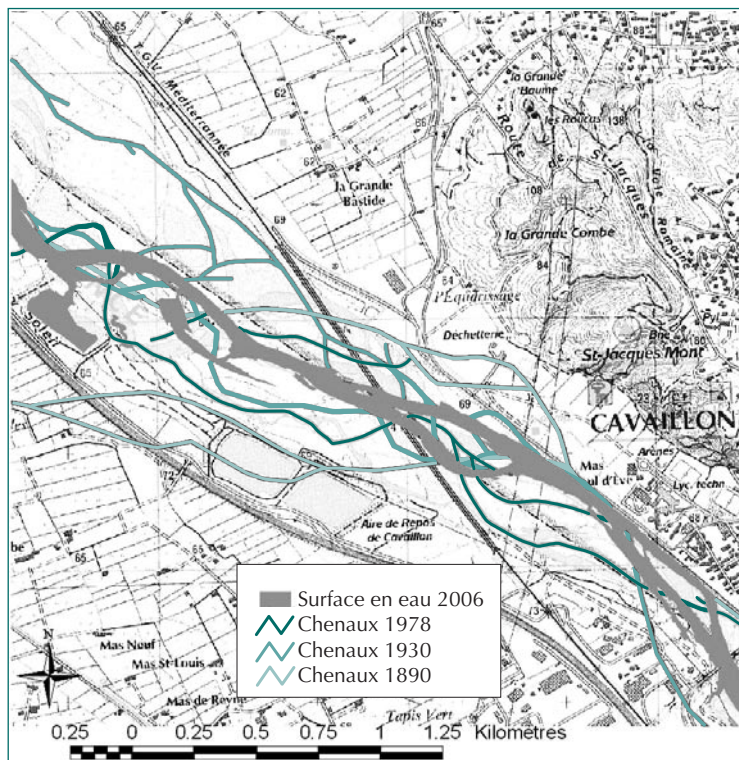
Outre l'encaissement des rivières, la protection des routes, infrastructures et terres agricoles et le prélèvement des granulats conduit au fur et à mesure du temps à la réduction de l'espace alloué à la Durance au profit des activités anthropiques (figure 7).

Cette réduction de la bande active de la rivière (Miramont, 1998) se traduit par une augmentation de la capacité de transport du TSS, de moins grandes surfaces de dépôts/reprises, mais est contrebalancée par une énergie moins forte liée à la création des tronçons court-circuités par les canaux agricoles puis hydroélectriques.

En parallèle, des interactions très complexes ont lieu entre le TSS d'une part, les bancs de graviers et la végétation d'autre part. Il en résulte, en général, une fixation des lits par des végétaux ligneux qui contribuent à ralentir les écoulements et à fixer les dépôts de sédiments fins durant les crues (Allain-Jegou, 2002)

LA GESTION DE L'EAU ÉVOLUE EN FONCTION DES BESOINS AGRO-ÉNERGÉTIQUES

Depuis les XII^e et XVI^e siècle, la Durance est captée à des fins agricoles et d'énergie, ce qui se révéla aussi intéressant en matière de colmatage



▲ Figure 7 – Chenalisation du cours d'eau (source : EDF).

4. Syndicat mixte d'aménagement de la vallée de la Durance.

des terrains improductifs (Bellidor, 1790). De nombreux canaux et prises d'eaux se mettent en place au XVIII^e et XIX^e siècles et, en 1907, les conflits d'usage aboutissent à la Convention exécutive de la Durance qui établit le partage de la ressource en eau. La dérivation des eaux vers la ville de Marseille permet à celle-ci de se développer.

En parallèle, de nombreux ingénieurs se penchent sur la création de retenues pour stocker l'eau du printemps afin de la restituer en été (Wilhelm, 1913). Un projet sur le site de Serre-Ponçon, retenu dans une première étude en 1897, est abandonné puis repris à plusieurs époques jusqu'à la construction du barrage de Serre-Ponçon en 1960, satisfaisant les usages agricoles et la forte demande énergétique. La Provence, dès lors à l'abri des sécheresses et de la pénurie d'eau potable, bénéficie d'un attrait touristique majeur et produit de l'énergie électrique. Cela modifie le régime hydrologique et contribue à stocker l'essentiel des transports solides amont (Mahiou, 2003). L'aménagement se complète ensuite par plusieurs ouvrages hydroélectriques entre 1960 et 1990. Associés à des canaux importants, ils détournent une grande partie des flux liquides et

dans une moindre mesure des flux solides du lit de la Durance (ceux-ci étant naturellement très élevés lors des restitutions en crues) – figure 8.

L'EXTRACTION DES GRANULATS CONTRIBUE À MODIFIER LE LIT DE LA DURANCE

Les extractions massives des granulats débutent dans les années cinquante et sont interdites dans le lit mineur depuis l'arrêté du 22/09/1994. Au total, elles ont été estimées entre 50 et 60 Mm³ (SMAVD⁴, 2003), et ont provoqué la remise en suspension des fines associées au gisement, un abaissement du lit, la création de souilles devenues aujourd'hui des zones de décantation régulées par des seuils.

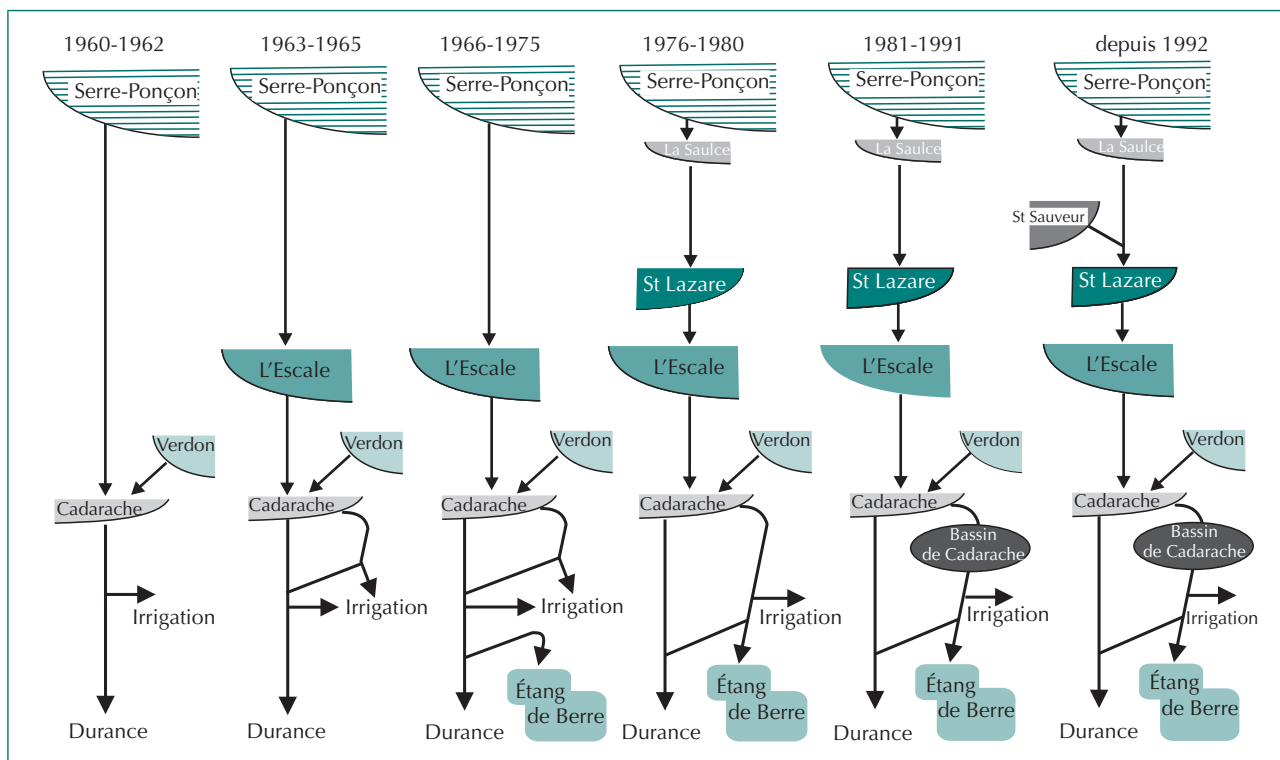
Discussion et conclusions

La perception du TSS change avec le temps

Du XIX^e siècle au XXI^e siècle, on assiste à une modification complète de la perception du rôle des sédiments fins : après plusieurs siècles où les limons étaient une richesse agricole, où il fallait gagner des terres sur le lit de la rivière et où la restauration des bassins versants était une priorité, nous sommes passés à une vision très différente où les sédiments fins sont sources d'impacts sur l'envasement des retenues et des souilles d'extraction, augmentent le risque d'inondation, le piégeage des polluants et le colmatage des habitats. La perception semble devenir plus équilibrée aujourd'hui au travers des enjeux écologiques marins notamment (nurseries estuariennes et recul du trait de cote).

La mesure du TSS reste peu structurée et donc fragmentaire

En réponse à ces perceptions variées, les études de TSS se sont modifiées au cours du temps. Après un XIX^e siècle où les études françaises font référence, l'effort métrologique se relâche et la constitution de longues chroniques n'est pas une priorité nationale. Si dans les années cinquante, l'aménagement des grands ouvrages hydroélectriques produit un regain d'intérêt sur le sujet avec quelques séries de mesures remarquables, celles-ci s'arrêtent peu après la construction des ouvrages et la vérification des hypothèses prises pour dimensionner le volume perdu... Alors que des réseaux de mesures de température, de pluviométrie et de débitmétrie se structurent, les



mesures de TSS restent d'initiative locale avec des méthodologies peu comparables (concentration volumique/massique, pas de temps...).

Si, à l'échelle nationale, les données environnementales englobent la mesure des MES, le pas de temps retenu ne permet pas l'estimation des flux. Depuis les années quatre-vingt-dix, un réseau de mesure en continu commence à prendre forme et quelques longues séries sont initiées en France grâce à l'apparition de nouveaux capteurs indirects en continu (turbidimètre, densimètre, ADCP⁵) qui nécessitent cependant des étalonnages fréquents et une maintenance onéreuse.

Les transports solides en suspension semblent s'affaiblir

Dans ces conditions, il est difficile de calculer une tendance statistique sur l'évolution du TSS

dans le bassin de la Durance. Néanmoins, la diminution observée des flux peut être reliée à plusieurs causes majeures : la restauration des terrains en zone de forte production sédimentaire, la création de la retenue à buts multiples de Serre-Ponçon, la modification de l'espace fluvial et les prélèvements de granulats ainsi que l'évolution des conditions hydroclimatiques. Ces causes ne sont bien évidemment pas indépendantes et donc très difficiles à hiérarchiser. Il devient alors fondamental de comprendre les mécanismes en jeu à différentes échelles, de la parcelle au grand bassin versant, en s'attachant à établir des bilans sédimentaires cohérents, appuyés sur des observations fines sur des périodes suffisamment longues mais aussi sur des mesures intégratrices rendues possibles grâce aux évolutions des mesures topographiques et bathymétriques (GPS⁶, LIDAR⁷, sondeurs multifaisceaux...). □

▲ Figure 8 – Historique de la création de retenues sur la Durance (source : EDF).

5. Courantomètre à effet Doppler, souvent dénommé par son abréviation anglophone ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) est un appareil basé sur l'effet Doppler capable d'enregistrer un profil des vitesses et directions du courant.

6. En anglais : *Global Positioning System* : géo-positionnement par satellite.

7. En anglais : *Light Detection and Ranging* : télédétection par laser aéroporté.

Résumé

L'objectif de cet article est de présenter, au travers de quelques exemples, un bilan du transport solide en suspension dans la Durance depuis cent-cinquante ans, en tentant de le relier aux changements du bassin et de l'hydroclimatologie. Cet exercice montre la difficulté d'isoler les facteurs un à un dans la mesure où les boucles de rétroaction sont multiples. Fondamentale pour l'érosion, la couverture forestière a, par exemple, été fortement augmentée pour atteindre environ 40 % du territoire national aujourd'hui. Avant 1948, cette augmentation est essentiellement due aux travaux de reboisement des montagnes (260 000 ha). Après cette date, on assiste surtout à des processus ponctuels de recolonisation naturelle des terrains dégradés. Sur des terrains marneux expérimentaux des Préalpes de Digne dans le bassin de la Durance, on mesure aujourd'hui une production spécifique annuelle de sédiments deux-cent-vingt fois moins importante dans un bassin versant végétalisé à 87 % que dans un bassin versant végétalisé à 32 %. Pour analyser cette donnée sur cette longue plage temporelle, il paraît également nécessaire de percevoir la « relation à l'objet d'étude » qu'entretiennent les scientifiques des différentes époques car leurs motivations influent directement sur les données et écrits qu'ils nous transmettent, ce qui devrait nous faire réfléchir sur ceux que nous allons laisser aux futures générations.

Abstract

The aim of this paper is to make a review of suspended sediment load in the Durance river for 150 years, trying to relate evolutions to changes in the basin and in hydroclimatology. This work illustrates the difficulty of isolating the factors of each others because the feedback loops between processes are numerous. Essential for erosion, forest cover, for example, has been significantly increased to approximately 40 % of the basin today. Before 1948, this increase is mainly due to reforestation of eroded mountains (260 000 ha). After that date, the processes of natural recolonization of degraded land is fundamental. On marly small experimental basins near Digne, in the Bleone sub-basin, we now measure specific annual production of sediments 220 times less important in a catchment with a vegetation coverage of 87 % that a catchment with a vegetation coverage of 32 %. To analyze the data during more than a century, it is also necessary to understand the « relationship to the object of study » that scientists from different periods have because their motivations directly affect the data and papers that they leave to us. This should make us think on those we will leave to future generations.

Bibliographie

- ALLAIN-JEGOU, C., 2002, *Relations Végétation-Écoulement-Transport solide dans le lit des rivières : étude de l'Isère dans le Grésivaudan*, thèse de doctorat en mécanique des milieux, géophysique et environnement, INPG, 197 p.
- ALLARY, C., 1998, *Mécanismes et bilans de l'érosion dans un bassin versant méditerranéen aménagé : le cas de la DURANCE (S-E France)*, Université Aix-Marseille III.
- BALDY, M., 1973, *Les problèmes d'apports solides rencontrés sur l'aménagement agro-industriel de la Durance*, 9^e congrès de la Commission internationale des irrigations et du drainage, R15/Q30.
- BALLAND, P., HUET, P., LAFONT, E., LETEURTROIS, J.-P., PIERRON, P., 2002, *Rapport sur la Durance – Propositions de simplification et de modernisation du dispositif d'intervention de l'État sur la gestion des eaux et du lit de la Durance*, Contribution à un plan Durance, MEDD, MAAPAR, METLTM, 93 p.
- BELIDOR, B.-F.-D., 1790, *Architecture hydraulique*, Paris, L. Cellot, 1782-1790.
- BONNIN, J., 1952, *Les débits liquides et solides de la Durance*, SHF, deuxièmes journées de l'Hydraulique, Grenoble.
- BOUSSINGAULT, J., 1851, *Économie rurale considérée dans ces rapports avec la chimie, la physique et la météorologie*, Paris, Béchet Jeune Éditeurs.
- CHARPENTIER DE COSSIGNY, J., 1889, *Hydraulique Agricole*, Paris, Baudry et Cie.
- COHEN, M., REY, F., 2005, Dynamiques végétales et érosion hydrique sur marnes dans les Alpes françaises du Sud, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 1, p. 31-44.
- COMBES, F., BARTET J.-H., 1982, Plaidoyer pour le pin noir en Haute-Provence, *Revue Forestière Française*, n° 5 spécial Restauration des Terrains en Montagne, p. 40-49.
- DARNAUDE, A., 2003, *Apports fluviaux en zone côtière et réseaux trophiques marins benthiques : transfert de matière organique particulaire*.
- DAUSSE, M., 1872, Huit études relatives aux inondations 1856-1864, *Mémoires présentés par divers savants à l'Académie royale des sciences de l'Institut de France*, tome 20, p. 287-463.
- DE CRECY, L., 1982, La Restauration des Terrains en Montagne, actualité d'une entreprise centenaire, *Revue Forestière Française*, n° 5 spécial Restauration des Terrains en Montagne, p. 7-17.
- DUGIED, P., 1819, *Projet de boisement des Basses-Alpes présenté à S. E. le ministre secrétaire d'état de l'intérieur*, Paris, Imprimerie Royale.
- EDF, 1951, *Données hydrologiques des stations de Pont Mirabeau et de l'Archidiacre*, Cahiers d'observations, Archives EDF-DTG.
- EUROSION, 2004, *Vivre avec l'érosion côtière en Europe : Espaces et sédiments pour un Développement Durable*.
- FIARD, M., 1831, Nouveau système d'encaissement des rivières, *Archives des découvertes et des inventions nouvelles pendant les années 1831 et 1832*, p. 280-283.
- HAEGELEN, 1927, Études poursuivies sur les débits solides des cours d'eau, *AISH*, n° 10, Venezia, 1927.
- HENIN, S., MICHON, X., 1957, Essai d'interprétation des mesures du débit solide effectué sur la Durance, *AISH*, n° 42, p. 369-378.
- HENIN, S., MICHON, X., GOBILLOT, T., 1953, Étude de l'érosion des vallées de Haute Durance et du Haut Drac, *AISH*, n° 36, p. 158-171.

IMBEAUX, M., 1892, *La Durance, régimes, crues et inondations*, Annales des Ponts et Chaussées, 7^e série, tome 3.

LE CREUX, M., 1804, *Recherches sur la formation et l'existence des ruisseaux, rivières et torrents*, Paris, Bernard.

LIÉBAULT, F., PIÉGAY, H., TAILLEFUMIER, F., 2000, Réponses géomorphologiques du Haut-Rou-bion (Drôme) à la reconquête végétale contemporaine de son bassin versant, *Forêt Méditerranéenne*, vol. 21, n° 2 spécial « Foresterranée'99 », p. 177-181.

MAHIOU, B., GIUGE, M., ROUX, D., BALLAND, P., 2003, *Le barrage de Serre-Ponçon – Retour d'expérience socio-économique de sa construction et évolution de son exploitation multiusages*, p. 123-142.

MANGON, H., 1869, *Expérience sur l'emploi des eaux dans les irrigations et sur les limons charriés par les cours d'eau*, Paris, Dunod Éditeur.

MATHYS, N., BROCHOT, S., MEUNIER, M. 1996, L'érosion des Terres Noires dans les Alpes du Sud : contribution à l'estimation des valeurs annuelles moyennes (bassins versants expérimentaux de Draix, Alpes-de-Haute-Provence, France), *Revue de Géographie Alpine*, vol. 84, n° 2, p. 17-27.

MINARD, C., 1851, *Cours de construction des ouvrages qui établissent la navigation des rivières et des canaux*, Liège, D. Avanzo et Cie.

MIRAMONT, C., JORDA, M., PICHARD, G., 1998, Évolution historique de la morphogenèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne : l'exemple de la moyenne Durance, *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 52, n° 3.

MUNTZ, A., LAINÉ, E., 1913, Les matériaux charriés par les cours d'eau des Alpes et des Pyrénées, *Comptes rendus de l'Académie des sciences (T157)*, p. 848-851.

MUNTZ, A., LAINÉ, E., 1915, Études sur la formation des limons et leur charriage par les cours d'eau dans les Alpes et les Pyrénées, *Comptes rendus de l'Académie des sciences (T160)*, p. 462-465.

PARDÉ, M., 1950, Quelques notions nouvelles ou améliorées sur l'érosion et les transports solides, *AISH*, n° 65, p. 166-176.

POIREL, A., 2004, *Étude du transport solide en suspension dans la Durance et ses affluents*, Grenoble, rapport Interne EDF.

PONCHELET, D., 1995, Le débat autour du déboisement dans les Basses Alpes 1819-1849, *Revue de Géographie Alpine*, n° 1.

REMENIERAS, G., BRAUDEAU, G., 1951, *Quelques observations sur l'alluvionnement dans les réservoirs français*, Congrès des Grands Barrages de New Delhi, Actes du Congrès.

REY, F., CHENOST, C. SIMON-TEISSIER, S., 2006, Forêt et érosion dans les bassins versants torrentiels, *Revue forestière française*, vol. 58, n° 4, p. 329-338.

RICHARD, D., MATHYS, N., 1999, Historique, contexte technique et scientifique des BVRE de Draix. Caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours de dix ans de suivi, in : *Actes du colloque « Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne »*, Draix, Le Brusquet, Digne, France, 22-24 octobre 1997, Cemagref, Grenoble, France, p. 11-28.

VALLAURI, D., CHAUVIN, C., MERMIN, E., 1997, La restauration écologique des espaces forestiers dégradés dans les Alpes du Sud. Chronique de 130 ans de restauration et problématique actuelle de gestion des forêts recrées en Pin noir, *Revue Forestière Française*, vol. 49, n° 5, p. 433-449.

WILHELM, Y., 1913, *La Durance. Étude de l'utilisation de ses eaux et de l'amélioration de son régime par la création de barrages*, Éd Levasseur Paris.

WORD COMMISSION OF DAM, 2000, *Barrages et développement : un nouveau cadre pour la prise de décisions*, Commission Mondiale des Barrages, novembre 2000.