

Origins and dynamics of suspended sediment in small agricultural catchments

J. LEFRANCOIS¹, C. GRIMALDI¹, C. Gascuel-Oudou¹ & N. Gilliet¹

1. UMR Sol, Agronomie, Spatialisation de Rennes-Quimper, INRA-Agrocampus
julie.lefrancois@rennes.inra.fr

Abstract Suspended sediment (SS) load constitutes an important component of quality of terrestrial hydrosystems (siltation of spawning gravel beds, pollutants transport...). Knowing where particles are coming from and when they are mobilised is important to prevent erosion. SS abundance increases with hedges sawing, bank destruction and agricultural practice. SS load depends also on hydrological factors (pluviometry and discharge). Studies usually concern either large groundwater basin, either few storm events, or the origins in terms of soil occupation (forest, culture, urban...). Our objectives are the identification of SS sources and their hydrological determinants on 3 small agricultural headwater catchments (< 6 km²). The bedrock is made up of Brioverian schist. Potential sources of SS are associated to processes: in-stream erosion (bank and weathered substratum), soil erosion and mobilisation of already deposited sediment. Interpretation of relationships during storm events between SS concentration (SSC) and discharge, both continuously taped, indicates that particles are coming from streams proximity. Some Cs¹³⁷ analysis on soil samples would confirm that particles are not coming from the hillslope soils. Geochemical analyses of potential sources are made to identify specific fingerprint of them. A mixing model gives the contribution of each source in the SS collected sample. Mobilisation of sources varied with hydrological factors. The sources contribution also differed from one stream to the other, due to different storm events performance. Annual suspended sediment budgets are different. As most of particles are coming from channel areas, the degree of bank degradation would explain part of these differences. The important contribution of the bank degradations, as a particles source, would incite to protect streams and closed areas.

Key words: suspended sediment, source, hysteresis, fingerprinting, headwater catchment

INTRODUCTION

Les matières en suspension (MES) sont impliquées dans la dégradation des écosystèmes aquatiques. Des augmentations de concentrations en MES peuvent entraîner une diminution de la pénétration de la lumière, un engorgement des frayères et une augmentation de l'agressivité des poissons. Les MES peuvent également être considérées comme des polluants, via les éléments toxiques qu'elles peuvent transporter (Martin and Meybeck, 1979).

Les concentrations en MES d'un ruisseau dépendent de l'érosion de zones plus ou moins proches du ruisseau (sols des versants, berges...) et des processus impliqués dans leur transport (remise en suspension des sédiments, stockage par dépôt...). Pour connaître



l'origine des MES, deux approches peuvent être utilisées. Une première approche, qui s'appuie sur l'étude des relations MES - débits à l'échelle de la crue, permet d'identifier les processus dominants impliqués dans la production et le transport des MES au cours de la crue. (Heidel, 1956 ; Arnborg *et al.*, 1967 ; Williams, 1989 ; Sickingabula, 1998). La seconde approche consiste à identifier, pour chaque source potentielle (sols des versants, berges, sédiments...), une signature géochimique spécifique (Collins *et al.* (1998), Walling *et al.* (1999), Russell *et al.* (2001)). L'application d'un modèle de mélange sur des échantillons de MES permet alors de déterminer la contribution relative de chacune des sources. La mobilisation des différentes sources est contrôlée par la taille du bassin versant (Klein, 1984 ;), les débits et la vitesse de l'eau (Van Rijn, 1984), eux-mêmes dépendant des précipitations et de l'humidité des sols (Seeger *et al.*, 2004).

Ces approches ont le plus souvent été mises en œuvre sur de grands bassins versants présentant des degrés d'anthropisation élevés. On peut supposer que les grands bassins présentent un fonctionnement différent des têtes de bassins, où un impact local peut avoir plus d'effet compte tenu de la taille du ruisseau.

Le Massif Armoricaïn présente un réseau hydrographique, ramifié et dense, constitué de nombreux petits ruisseaux. Dans cette région, de nombreuses pratiques agricoles sont à l'origine d'une production accrue de MES dans les cours d'eau : sols nus une partie de l'année, arasement des haies, recalibrage des berges, modifications des écoulements...

L'objectif de notre étude est d'identifier les sources et processus dominants à l'origine des teneurs en MES dans trois petits ruisseaux du Massif Armoricaïn, en utilisant les deux approches précédentes. Alors que Klein (1984), Brasington et Richards (2000), Steegens *et al.* (2000) et Goodwin *et al.* (2003) n'ont étudié les relations MES-débit que pour quelques événements pluvieux, notre étude prend en considération toutes les crues enregistrées au cours d'une année hydrologique. Au cours de cette année, l'évolution de l'origine des MES et la



dynamique temporelle des MES (concentrations et flux) seront mises en relation avec les paramètres climatiques, depuis l'échelle de la crue jusqu'à l'échelle saisonnière.

L'avancement de nos travaux n'est pas identique pour chacune des approches. Les résultats présentés sont essentiellement issus de la mise en œuvre de la première approche.

MATERIELS ET METHODES

Les sites d'études

Les trois bassins versants reposent sur des schistes Briovériens (Langevin *et al* , 1984 ; Pellerin et Van Vliet-Lanoe, 1998) surmontés par des placages de limons éoliens plus ou moins épais. Les épaisseurs des couches d'altérites et limons sont variables (Fig. 1). Les sols sont limoneux et organisés en deux grands domaines : les sols bien drainés des plateaux et versants, et les sols hydromorphes des bas de versant et fonds de vallée. Le climat y est océanique, avec des précipitations réparties sur l'année. Le réseau bocager est encore assez présent, même s'il a subi de nettes diminutions depuis 1950 (Viaud, 2004).

Le Bassin versant du Coët-Dan

Le ruisseau du Coët-Dan se situe dans le nord-ouest du Morbihan, à 20 km au sud est de Pontivy. C'est un affluent de l'Evel, lui-même affluent du Blavet. La superficie du sous bassin de Kervidy est de 4,9 km². La pente est relativement faible (entre 1 et 2%). La largeur du ruisseau à l'exutoire est de 2 m.

La pluviométrie moyenne interannuelle sur 22 ans est de 713 mm. Le sous bassin de Kervidy a un écoulement généralement non pérenne, le ruisseau se tarit en été, de la mi-juillet à la mi-novembre.

L'agriculture y est intensive et dominée par l'élevage laitier et l'élevage hors sols de porcs et volailles. L'occupation de sol suit l'évolution des élevages : maïs grain (pour l'alimentation



des porcins et des volailles), maïs ensilage (pour l'alimentation des bovins), et céréales dominant alors que quelques prairies subsistent.

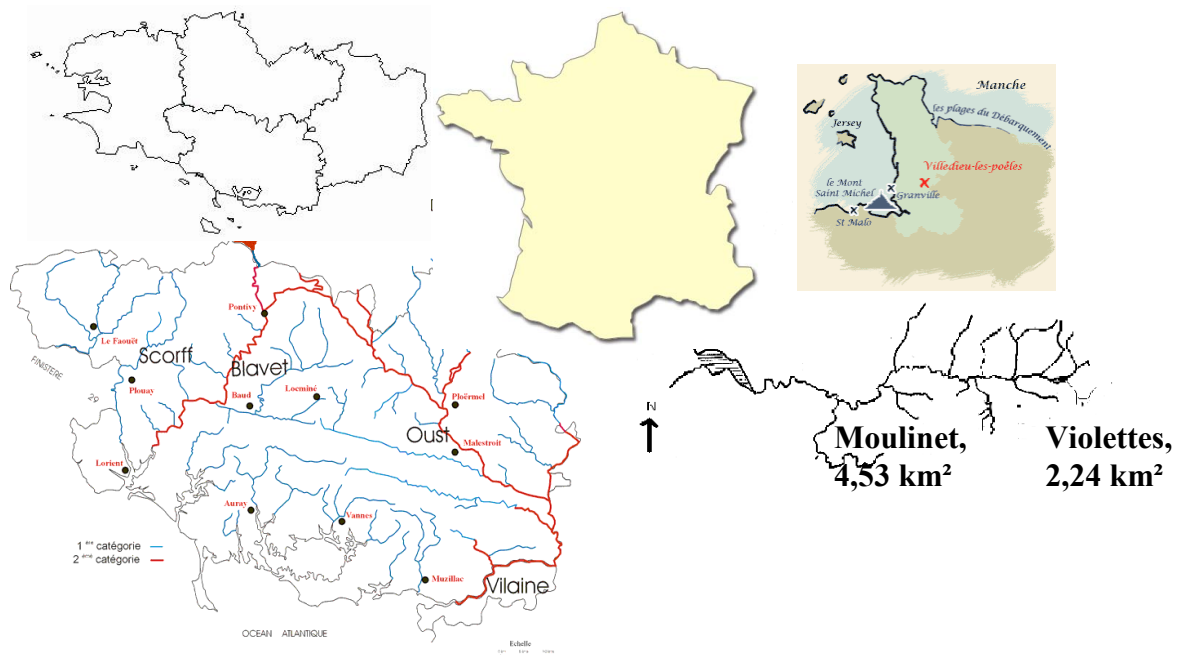


Fig 1. Localisation des sites d'étude

Les Bassins versants du Moulinet et des Violettes

Les ruisseaux du Moulinet et des Violettes se situent dans l'ouest de la Manche, à 10 km d'Avranches. Ce sont deux affluents de l'Oir, lui-même affluent de la Sélune, qui se jette dans la baie du Mont St Michel, dans la Manche. Les superficies respectives des bassins versants sont de 4,53 et 2,24 km². La pente moyenne est de 1,8 % sur chacun des cours d'eau. La largeur des ruisseaux aux exutoires est inférieure à 1,5 m.

La pluviométrie moyenne interannuelle sur 21 ans est de 900 mm. Les BV présentent des écoulements pérennes.

L'agriculture est semi-intensive. En 2001, 46% des sols sont occupés par des prairies tandis que le maïs et le blé en recouvrent 47%. 93% des parcelles jouxtant le ruisseau sont en prairies, et 7% sont sous céréales.

Instrumentation et traitement des données



Débit-turbidité Les exutoires du Moulinet et des Violettes ont été équipés de décembre 2001 à mars 2005 d'un débitmètre et d'un turbidimètre. Sur le Coët- Dan, le suivi des débits a été assuré par une station de jaugeage installée de février 1993 à mars 2005. Un turbidimètre y a également été installé de janvier 2004 à mars 2005.

Les débitmètres sont placés dans des sections en bois calibrées qui canalisent l'eau de façon à rendre les écoulements les plus uniformes possibles (Birgand *et al.*, 2004).

La station de jaugeage permet de déterminer le débit (Q), à tout instant, à partir du repérage du niveau de l'eau (h) enregistré par un limnimètre. La correspondance entre les cotes de ce plan d'eau et les débits est établie grâce à des jaugeages permettant d'obtenir la courbe de tarage, expression de la fonction $Q = f(h)$ (Carluer, 1998).

La turbidimétrie est obtenue par l'émission d'un signal lumineux, qui s'atténue dans l'eau en fonction de la turbidité, et qui est transmis à un système optique. Les mesures de turbidité sont exprimées en FTU (Formazine Turbidity Unit). Le turbidimètre a été étalonné en laboratoire en utilisant des solutions de Formazine (NF EN ISO 70 27). Des relations concentrations en MES-turbidité ont été établies pour chacun des ruisseaux à partir de mesures réalisées sur des échantillons prélevés lors de quelques crues et de prélèvements bimensuels aux exutoires (Birgand *et al.*, 2004).

Les mesures des débitmètres et des turbidimètres sont enregistrées toutes les 30 secondes et moyennées toutes les 10 minutes. Les mesures du limnimètre sont enregistrées au pas de temps de la minute.

Collecteurs En chacun des exutoires, ont été installés des collecteurs à MES. Ces pièges consistent en des tubes de PVC de 130 cm de long, ouverts aux deux extrémités pour permettre un passage de l'eau. Les sections d'entrée et de sortie sont réduites d'un tiers par rapport au diamètre du tube (9 cm), ce qui permet une certaine diminution de la vitesse à



l'intérieur du tube : les particules peuvent se déposer. Les échantillons récoltés sont mis à filtrer puis séchés à 40°C.

METHODES

Dynamique des particules et processus dominants impliqués en crue

La dynamique des particules est étudiée, en crue et hors crue, grâce à l'enregistrement des données de turbidité et de débit en chacun des exutoires.

En crue, les relations concentrations en MES-débits sont régulièrement utilisées dans la compréhension des processus et des contrôles, relatifs au transport de particules et qui peuvent évoluer dans le temps (Williams, 1989 ; Sickingabula, 1998). Les processus dominants identifiables sont la remise en suspension de sédiments déposés, l'arrivée de particules issues de sources proches du ruisseau, l'arrivée de particules issues de sources plus lointaines.

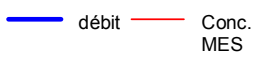
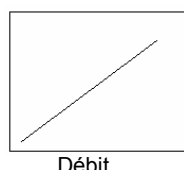
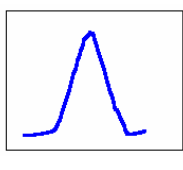
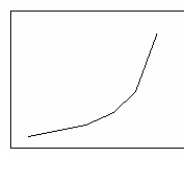
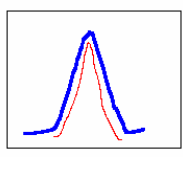
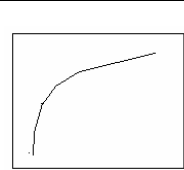
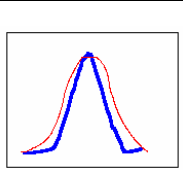
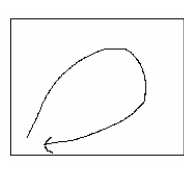
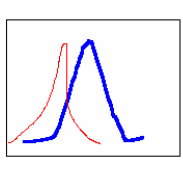
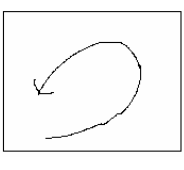
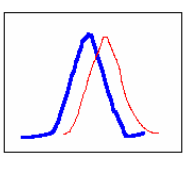
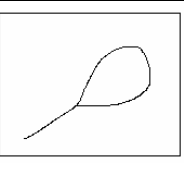
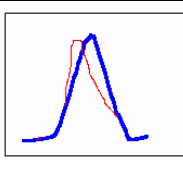
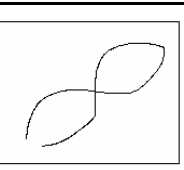
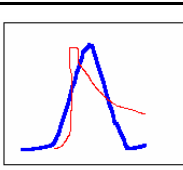
Les allures des crues correspondant à ces processus, ont été présentées par Williams (1989). Elles répondent à des critères simples et à diverses interprétations selon les auteurs (Fig. 2).

Identification des sources et signatures géochimiques

Les sources potentielles considérées sont : les sols du bassin versant, les sols des abords du ruisseau, les berges, les sédiments déjà déposés, le fond du ruisseau (substrat). Les échantillons sont prélevés et séchés à 40°C. Les analyses chimiques (ICPMS) sont effectuées sur les fractions inférieures à 50 µm.

Pour chacune des sources, une signature géochimique est recherchée. Cette signature est une combinaison de plusieurs éléments ou de rapport d'éléments. Le choix de cette signature passe par différentes étapes, explicitées dans Collins *et al.* (1998) et résumées dans la Fig. 3. Un modèle de mélange appliqué à des échantillons de MES devrait permettre d'évaluer les contributions relatives de chacune des sources.



Cl.	Type de Relation	illustration		interprétation
				
1	a. rectiligne			<ul style="list-style-type: none"> - Crues de transport des matériaux (1) - Matériaux désolidarisés des berges et déjà érodés (2) - Après des crues où les particules fines sont parties (3) - Arrivée continue de matériaux selon débit et granulométrie (3)
	b. curviligne convexe			
	c. curviligne concave			
2	boucle horaire			<ul style="list-style-type: none"> - Remise en suspension puis érosion et dilution (4) (1) - Epuisement du stock de sédiment (2)(1) - Particules des zones proches du corridor (8)(7)(6)(5)(2)(1)
3	boucle anti-horaire			<ul style="list-style-type: none"> - Sources lointaines (9) (7) (6) (2) - Après un grand événement pluvieux qui a tout enlevé (3) - différence de vitesse entre onde de particule et onde d'eau (3)
4	rectiligne plus boucle			<ul style="list-style-type: none"> - Combinaison des classes 1 et 2 (5) - Dépend de la disponibilité, du stock et du transport de MES (5)
5	figure en huit			<ul style="list-style-type: none"> - Combinaison des classes 2 et 3 (5) - Dépend de la disponibilité en particules, et des débits (5)

(1) Jansson, 2002 ; (2) Lenzi et Lorenzo, 2000 ; (3) Hudson, 2003 ; (4) Picouet *et al.*, 2003 ; (5) Williams, 1989 ; (6) Orwin et Smart, 2004 ; (7) Seeger *et al.*, 2004 ; (8) Klein, 1984 ; (9) Brasington et Richards, 2000

Fig 2. Les différentes classes d'hystérésis dans les relations concentrations en MES – débit et leurs interprétations.

Par ailleurs, des mesures de Cs^{137} , effectuées sur des échantillons prélevés le long de transects situés dans un contexte a priori favorable à l'érosion, devraient confirmer la faible



participation des processus d'érosion des sols du bassin (hypothèse pressentie dans un contexte de bocage).

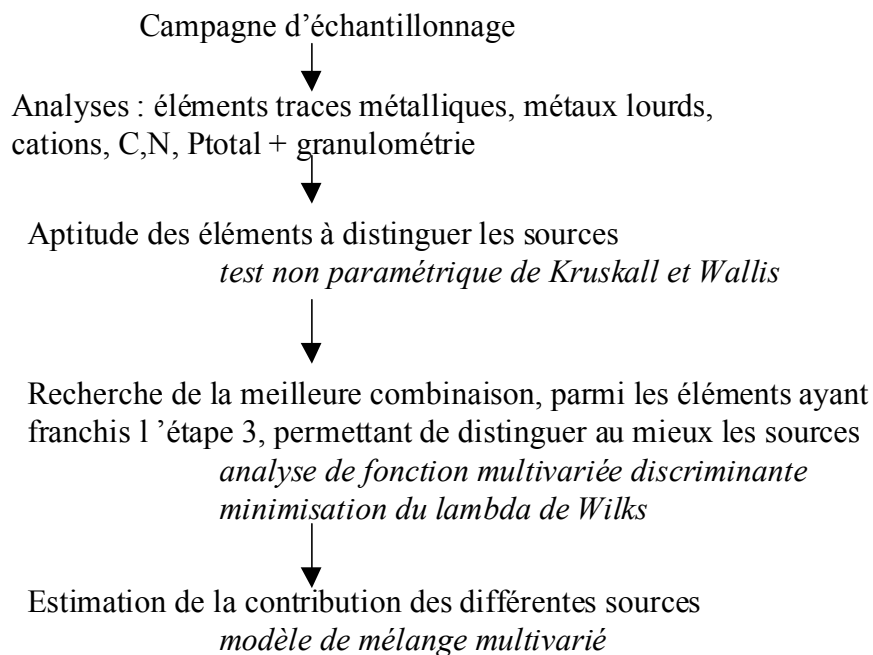


Fig 3. Détermination des sources selon leurs signatures géochimiques

Les échantillons de MES utilisés pour le modèle de mélange sont récoltés dans des conditions ciblées : crue ou hors crue. Pour une même crue, on dispose donc d'informations sur les processus dominants à l'origine des teneurs en MES, via la dynamique des relations concentrations en MES-Débits, et sur la contribution effective des différentes sources de ces MES.

Déterminants hydrologiques de la mobilisation des sources

La mobilisation des MES dépend de la pluviométrie associée à l'événement pluvieux. Des analyses multi variées devraient permettre d'associer à chaque processus identifié, des conditions hydrologiques ciblées. Sont pris en considération les paramètres suivants : quantité de pluie précédant l'évènement pluvieux, son intensité maximale, le cumul de pluie pendant l'évènement, le débit antérieur, le débit postérieur, l'amplitude de crue, le débit maximal...



RESULTATS

Dynamique des particules et processus dominants impliqués en crue

Les 3 bassins versants présentent des dynamiques différentes. Les charges hors crue sont nulles ou quasi nulles sur le Coët-Dan, alors que pour les 2 autres bassins versants, les concentrations sont voisines de 20-35 mg l⁻¹ et les flux hors crue représentent alors près de 30% des flux annuels totaux. Les classes de crues identifiées sur les ruisseaux sont présentées en Fig. 4. Alors que certaines classes se rencontrent toute l'année, d'autres semblent spécifiques d'une ou deux saisons. C'est le cas des crues de remise en suspension, dont le nombre et la contribution sont les plus importantes à l'automne. La contribution des différentes classes de crues aux bilans de MES n'est pas proportionnelle à leur fréquence. Ainsi, il s'avère que 5 fois plus de MES peuvent être transportées lors de trois crues de classe 1 que pour 7 crues de classe 3.

Le nombre de crues impliquant plusieurs processus est assez élevé.

Identification des sources de MES par leur signature géochimique

La source substrat du fond du ruisseau présente des teneurs en éléments très différentes des autres sources. Cette source est facilement distinguable des autres.

En ce qui concerne les sources sols du versant, sols des bas fonds, berges et sédiments, les distinctions sont moins aisées, mais semblent exister. La détermination des paramètres discriminatoires n'est pas encore aboutie.

Déterminants hydrologiques de la mobilisation des sources

L'occurrence de certaines crues au cours de l'année semble être liée à des contextes hydrologiques particuliers. Les premiers résultats montrent par exemple, que les crues de classe 4 ont pu être rapprochées d'événements pluvieux à caractère orageux : pluie intense, événement bref.



Cl.	Type de Relation	illustration	
1	a. rectiligne		
	b. curviligne convexe		
	c. curviligne concave		
2	boucle horaire		
3	boucle anti-horaire		
4	rectiligne plus boucle		
5	figure en huit		

Fig 4. Les classes d'hysteresis des relations concentrations en MES – débits identifiées sur les 3 ruisseaux.



DISCUSSION ET CONCLUSION

L'étude de la dynamique des particules a permis de mettre en évidence la caractère saisonnier de certains processus à l'origine de leur mobilisation. Les classes de crues présentées par Williams (1989) et illustrées en Fig. 2 ont des morphologies idéales. Le passage d'une classe à une autre n'est pas net, il existe diverses crues dont les allures traduisent une transition entre 2 classes. Par ailleurs, le nombre de crue combinant plusieurs processus est important, il est alors difficile de déterminer quelle est la contribution de chacun des processus sur un pas de temps donné. Afin de pouvoir classer toutes les crues, nous avons dû affiner et adapter des critères de discrimination, orientés vers une interprétation relative aux processus. Les résultats sont alors plus explicites.

Concernant la deuxième approche, la difficulté réside dans la proximité géochimique des sources de MES que nous souhaitons distinguer. La nature des sols et berges est très semblable. Les sédiments n'ont pas un temps de séjour suffisamment long pour se différencier nettement des matériaux d'origine. L'utilisation de rapports d'éléments devrait cependant permettre une meilleure discrimination des pôles sources. La possibilité de pouvoir associer un contexte et des déterminants hydrologiques à chaque type de crue semble exister. Les trois aspects continuent d'avancer conjointement. Des résultats pour chacun d'eux devraient aboutir pour 2006.

BIBLIOGRAPHIE

- Arnborg, L., Walker, H.J., and Peippo, J. (1967) Suspended load in the Colville River, Alaska, 1962. *Geograf. Annal.* 49, 131-144.
- Birgand, F., Lefrançois, J., Grimaldi, C., Novince, E., Gilliet, N. Gascuel-Oudou, C. (2004) Mesure des flux et échantillonnages des matières en suspension sur de petits cours d'eau. *Ingénieries*. 40, 21-35.
- Carlier N. (1998) Vers une modélisation hydrologique adaptée à l'évaluation des pollutions diffuses : prise en compte du réseau anthropique. Application au bassin versant de Naizin (Morbihan). PhD thesis. Cemagref.



- Collins, A.L., Walling, D.E., Leeks, G.J.L. (1998) Use of composite fingerprints to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers. *Earth Surf. Process. Landforms*. 23, 31-52.
- Brasington, J., & Richards, K. (2000) Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hilles. *Hydrological processes*. 14, 2559-2574.
- Goodwin, T.H., Young, A.R., Holmes, G.R., Old, G.H., Hewitt, N., Leeks, G.J.L., Packman, J.C., Smith, B.P.G (2003) The temporal and spatial variability of sediment transport and yields within the Bradford Beck catchment, West Yorkshire. *The Science of the Total Environment*. 314/316, 475-494.
- Heidel, S.G., (1956) The progressive lag of sediment concentration in flood wave. *Trans. Am. Geophys. Union*. 37, 56-66.
- Hudson, P.F. (2003) Event sequence and sediment exhaustion in the lower Panuco basin, Mexico. *Catena*. 52, 57-76.
- Jansson, M.B. (2002) Determining sediment source areas in a tropical basin, Costa Rica. *Catena*. 47, 63-84.
- Langevin, C., Minoux, L., L'Homer, A., Lautridou, J.-P., Dassibat, C., Verron, G. (1984) Notice explicative de la carte géologique d'évranche à 1/50 000. *BRGM*. 34p.
- Lenzi, M.A., & Lorenzo, M. (2000) Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena*. 39, 367-282.
- Klein, M. (1984) Anticlockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms : Holbeck catchment ; Yorkshire, England. *Catena*. 11, 251-257.
- Krause, A.K., Franks, S.W., Kalma, J.D., Loughran, R.J., Rowan, J.S. (2003) Multi-parameter fingerprinting of sediment and deposition on small gullied catchment in SE Australia. *Catena*. 53, 321-348.
- Martin, J.M., & Meybeck, M. (1979) Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Marine chemistry*. 7, 173-206.
- Orwin, J.F. and Smart, C.C. (2004) The evidence for paraglacial sedimentation and its temporal scale in the deglaciating basin of Small River Glacier, Canada. *Geomorphology*. 58, 175-202.
- Pellerin, J., Van Vliet-Lanoe, B. (1998). Le Bassin du Coët-Dan au cœur du Massif Armoricaïn : 2 analyses cartographiques de la région de Naizin. In Cheverry C., Agriculture Intensive et qualité des eaux, Paris, Inra éditions. 17-24.
- Picouet, C., Hingray, B., Olivry, J.C. (2001) Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger river basin. *Journal of Hydrology*. 250, 19-39.
- Russell, M.A., Walling, D.E., Hodgkinson, R.A. (2001) Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. *J. Hydrol.* 252, 1-24.
- Seeger, M., Errea, M.-P., Begueria, S., Arnaez, J., Marti, C and Garcia-Ruiz, J.M. (2004) Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteresis loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology*. 288, 299-311.
- Sichingabula, H.M. (1998) Factors controlling variations in suspended sediment concentration for single-valued sediment rating curves, Fraser River, British Columbia, Canada. *Hydrological processes*. 12,1869-1894.
- Steegens, A., Govers, G., Nachtergale, J., Takken, I., Beuselinck, L., and Poesen, J. (2000) Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt of central Belgium. *Geomorphology*. 33, 25-36.
- Van Rijn, L.C. (1984) Sediment transport, Part II: suspended sediment load transport. *J. Hydraulic Eng. ASCE*, 110, 1613-1641.



- Viaud, V. (2004) Organisation spatiale des paysages bocagers et flux d'eau et de nutriments. PhD thesis. INRA, Agrocampus Rennes.
- Walling, D.E., Owens, P.N., Leeks, G.J.L., Wass, P.D. (1999) Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Hydrol. Process.* 13, 955-975.
- Williams, G.P. (1989) Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology.* 111, 89-106.

