



Impact des sédiments cohésifs sur l'écosystème

Nicolas Gratiot

► To cite this version:

Nicolas Gratiot. Impact des sédiments cohésifs sur l'écosystème. Hydrologie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2010. tel-00534075v1

HAL Id: tel-00534075

<https://theses.hal.science/tel-00534075v1>

Submitted on 8 Nov 2010 (v1), last revised 18 Nov 2010 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Impact des sédiments cohésifs sur l'écosystème



Nicolas Gratiot

*Chargé de Recherches à l'IRD
LTHE (UMR 5564), Equipe River
CERMO, 460 Rue de la piscine
BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9*

Programme de replantation de mangrove en Erythrée (J.K. Tiwari).

Trace d'une tortue luth après la ponte sur une plage Guyanaise (Cliché du Centre d'écologie et physiologie énergétique, Strasbourg)

Erosion régressive, bassin versant de Cointzio, ANR Streams (Cliché J.Poulenard)

Jury :

Rapporteurs

Jean loup Guyot. Directeur de Recherche de 1^{ère} classe, IRD

Thème de recherche : géochimie et transfert de matières dans la bassin versant Amazonien.

Il est co-auteur d'une septantaine d'articles indexés dans le WOS.

Ian Droppo. Chercheur au National Water Research Institute / Canada Centre for Inland Waters (Burlington, ON).

Thème de recherche : qualité des sédiments, gestion des écosystèmes aquatiques, protection des lacs et rivières. I. Droppo fait partie du conseil d'administration de l'Association internationale pour la science des eaux contenant des sédiments (IASWS). Il est éditeur pour le Journal of Soils and Sediments dans le thème *Sediment and dredged material treatment*.

Il est co-auteur d'une soixantaine d'articles indexés dans le WOS.

Alain Crave, Chargé de recherche de 1^{ème} classe, CNRS.

Thème de recherche : transport des sédiments sur les surfaces continentales et influences géomorphologiques. Il est animateur du Groupe de Recherche Transport Solide.

Il est co-auteur d'une vingtaine d'articles indexés dans le WOS.

Examineurs

Georges Vachaud. Directeur de Recherche émérite, CNRS, Grenoble.

Thème de recherche : flux fluide et solide en milieu continental et impact sur l'écosystème. Il possède une sensibilisation forte pour les études dans les pays du Sud, notamment le vietnam.

Il est co-auteur d'une soixantaine d'articles indexés dans le WOS. Il a été éditeur en chef de Journal of Hydrology de 1995 à 2007.

Sylvain Ouillon. Indisponible, excusé. Directeur de recherche de 2^{ème} classe, IRD.

Thème de recherche : transport de matière en suspension en zone côtière : mesure, télédétection, modélisation.

Il est co-auteur d'une trentaine d'articles indexés dans le WOS.

Robert Lafite. Indisponible, excusé. Professeur à l'Université de Rouen.

Thème de recherche : matières en suspension en domaine estuarien et côtier : caractérisation, formation, dynamique, floculation.

Il est co-auteur d'une quarantaine d'articles indexés dans le WOS.

Sandrine Anquetin. Directeur de recherche au CNRS.

Thème de recherche : matières en suspension en domaine estuarien et côtier : caractérisation, formation, dynamique, floculation.

Il est co-auteur d'une quarantaine d'articles indexés dans le WOS.

Résumé des actions de recherche et de leur contexte :

Mon activité de recherche concerne la dynamique des sédiments cohésifs, appliquée aux écosystèmes côtiers et continentaux. Du fait de son impact sur le transit des polluants et la dégradation des sols, cette activité figure au coeur des missions de l'Institut de Recherche pour le Développement auquel j'appartiens. La dégradation de la quantité et de la qualité des sols constitue un enjeu de Société, notamment en terme de sécurité alimentaire.

Les principaux résultats de recherche obtenus concernent :

1. les processus physiques de dépôt des sédiments cohésifs dans les systèmes aquatiques naturels (laboratoire et estuaire de la Gironde)
2. la vulnérabilité de l'écosystème côtier aux modifications géomorphologiques (Guyane)
3. la dégradation des écosystèmes continentaux semi-arides par érosion des sols (France et Mexique)

1. Le premier thème de recherche a essentiellement été abordé sous un angle expérimental et analytique en étroite collaboration avec M. Mory, H. Michallet (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, Grenoble) et A. Manning (Marine Institute of the University of Plymouth, UK) dans le cadre du projet européen COSINUS. Les avancées principales attrahent à la floculation des sédiments fins et la dynamique des fluides stratifiés particulières en milieux naturels (rivière, lac, estuaire, côte). Le flux massique de dépôt des sédiments ϕ croît fortement avec la concentration en matière solide C dans la gamme $[0-1] \text{ g.l}^{-1}$. La diminution de la distance inter-floc ($d/D_f \sim O(10)$) entraîne une augmentation du nombre de chocs et favorise la floculation. Pour des concentrations plus élevées ($1-5 \text{ g.l}^{-1}$), nous avons pu montrer expérimentalement que l'augmentation drastique du nombre de collisions ne modifiait pas le caractère constructif (floculation) des collisions et cela, même dans des conditions de turbulence significatives (Gratiot and Manning, 2004 ; 2007a ; 2007b).

Pour des concentrations dans la gamme $C=[5-100] \text{ g.l}^{-1}$, le comportement des sédiments cohésifs nécessite une approche multidisciplinaire alliant la physique des floes, la mécanique des fluides et la rhéologie. Du fait des difficultés d'instrumentation inhérentes aux crèmes de vase (très forte concentration, mesures très près du fond), nos contributions les plus significatives sur le dépôt des sédiments cohésifs ont été obtenues en laboratoire (Gratiot et al., 2005) puis ont été appliquées sur l'estuaire de la Gironde dans le cadre d'une collaboration avec l'UMR Environnements et Paléoenvironnements OCéaniques (EPOC, Bordeaux) et le Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI, Grenoble) (Sottolichio et al., submitted). Nous avons pu montrer que l'évolution du flux de chute des sédiments ($\phi \Rightarrow C$) varie de plusieurs ordres selon la nature des sédiments (cohésifs ou non cohésifs), le régime de l'écoulement (laminaire ou turbulent) et la concentration.

2. A plus grande échelle, nous nous sommes intéressés à la dynamique de l'écosystème côtier du plateau des Guyanes (Amérique du Sud). Ce travail s'est fait en interaction avec différents acteurs de la recherche (acteurs du Programme National d'Environnement Côtier : chantier

Guyane), de l'Observation de la Terre depuis l'espace (CNES-CSG) et de la protection de la Nature (WWF, association Kwata). Le développement de méthodes de suivi de l'écosystème et le couplage des approches de laboratoire et de terrain ont conduit à des avancées quant à la migration des bancs de vase (Baghdadi et al., 2004 ; Gardel and Gratiot, 2005, 2006 ; Gratiot et al., 2007 ; Anthony et al., 2008 ; Gratiot et al., 2008), la colonisation de la frange côtière par la mangrove (Fiot and Gratiot 2006 ; Proisy et al. 2009) ou encore la vulnérabilité de l'écosystème à la dynamique côtière (Lefebvre et al. 2004 ; Gratiot et al., 2006 ; Kelle et al., 2007, 2009). Le résultat le plus original précise le rôle du cycle nodal de marée (à 18.6 ans) sur la vulnérabilité côtière, avec des extrapolations possibles à l'échelle planétaire (Gratiot et al., 2008).

3. Depuis mon intégration au sein de l'équipe RIVER du Laboratoire des Transferts en Hydrologie et Environnement (jan. 2005), j'aborde la dynamique sédimentaire en milieu continental semi-aride. Deux sites pilotes (BV de la Bléone, France ; BV de Cointzio, Mexique) ont été retenus et sont soutenus au plan national (projet ANR STREAMS, 2007-2009) et international (projet Européen DESIRE, convention IRD-Univ. National. Auton. de Mexico, 2007-2011).

Le suivi en continu du réservoir de Cointzio a révélé un fonctionnement hydro-sédimentaire particulièrement contraignant, tant pour l'écosystème que pour les gestionnaires. Situé dans un environnement de pluie tropicale de montagne, les caractéristiques morphométriques du réservoir (profond et de faible volume) amplifient les variabilités locales. L'écosystème lacustre s'adapte donc à des conditions environnementales très contrastées au cours de l'année (Susperregui et al., 2009 ; Némery et al., 2009).

L'évolution pluri-décennale du cycle de l'eau sur le bassin versant de Cointzio a, quant à elle, révélé une augmentation significative de la contribution des eaux de ruissellement vis-à-vis des eaux de nappes (Gratiot et al., 2010). Cette évolution est une conséquence directe et préoccupante des changements anthropiques engagés depuis les années 1970.

Les travaux en cours visent à caractériser les temps de résidence des sédiments, les flux sédimentaires et biogéochimiques associés, en couplant approches hydro-sédimentaire et de traçage (par éléments majeurs, par spectrométrie et par datation isotopique) (Duvert et al., 2009 ; Evrard et al., in prep.). Par la suite, l'inter comparaison des bassins versants de la Bléone (France) et de Cointzio (Mexique) devrait permettre des avancées significatives quant à l'optimisation des protocoles d'échantillonnage (Borga et al., 2008 ; Némery et al., 2010) et la définition des invariants qui gouvernent la dynamique sédimentaire des bassins versants de meso-échelle.

References citées :

- Anthony, E.J., Dolique, F., Gardel, A., Gratiot, N., Proisy, C. and Polidori, L. 2008. Nearshore intertidal topography and topographic-forcing mechanisms of an Amazon-derived mud bank in French Guiana. *Contl Shelf Res*, (28), 813-822.
- Borga, M., Gaume, E., Creutin, J.D., Marchi, L. 2008. Surveying flash floods: gauging the ungauged extremes. *Hydrological Processes*. 22, 3883–3885.
- Baghdadi, N., Gratiot, N., Oliveros, C., Lefebvre, J.-P., Bourguignon, A. 2004. Coastline and mudbank monitoring in French Guiana Contributions of radar and optical satellite imagery. *Can. J. Remote Sensing*. 30 No2, 109-122.

- Duvert, C., Gratiot, N., Némery, J., Prat, C., Anguiano, R., Collet, L., Esteves, M., Interpreting the suspended sediment dynamics in a mesoscale river basin of Central Mexico using a nested watershed approach. *AGU San Francisco, Dec 2009*.
- Evrard, O., Némery, J., Gratiot, N., Duvert, C., Ayrault, S., Lefèvre, I., Poulenard, J., Prat, C., Esteves, M., Residence times and main sources of sediment in subtropical highland catchments of central Mexico. *Submitted*.
- Fiot, J. and Gratiot, N. 2006. Structural effects of tidal exposures on mudflats along the French Guiana coast (N.E. South America). Experimental and field approaches. *Marine Geology*. 228, 25-37.
- Gardel, A. and Gratiot, N., 2006. Monitoring of coastal dynamics in French Guiana from 16 years of SPOT satellite images., *Journal of Coastal Research*, SI (39), 1503-1506.
- Gardel, A. and Gratiot, N., 2005. A satellite image-based method for estimating rates of mud bank migration, French Guiana, South America. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 720-728.
- Gratiot, N., Duvert, C., Collet, L., Vinson, D., Némery, J., Saenz-Romero, C., 2010. Increase in surface runoff in the central mountains of Mexico: lessons from the past and predictive scenario for the next century. *HESS* (14) 2, 291-300.
- Gratiot, N., Anthony, E., Gardel, A., Gaucherel, C., Proisy, C. and Wells, J.T. 2008. Significant contribution of the 18.6 year tidal cycle to regional coastal changes. *Nature Geoscience*. (1), 169-172.
- Gratiot, N., Gardel, A., Anthony, E. 2007. Trade-wind and mud dynamics on the French Guiana coast, South America: input from ERA-40 wave data and field investigations. *Marine Geology*. 236, 15-26.
- Gratiot, N., and Manning, A.J. 2007. A laboratory study of dilute suspension mud floc characteristics in an oscillatory diffusive turbulent flow. *Journal of coastal research*. SI(50).
- Gratiot, N. and Manning, A.J., 2007. Flocculation processes in concentrated benthic suspension layer (CBS) using a laboratory diffusive turbulent grid tank. In: T. Kudusa, H. Yamanishi, J. Spearman and J.Z. Gailani, (eds.), *Sediment and Ecohydraulics - Proc. in Marine Science, INTERCOH 2005*, Amsterdam: Elsevier, 518 pp.
- Gratiot, N., Gratiot, J., de Thoisy, B., Kelle, L. 2006. Estimation of marine turtles nesting season from incomplete data ; statistical adjustment of a sinusoidal function. *Animal Conservation*, 9, 95-102.
- Gratiot, N.; Michallet, H.; Mory, M. 2005. On the determination of the settling flux of cohesive sediments in a turbulent fluid. *J. Geophys. Res.*, Vol. 110, No. C6, C06004.
- Gratiot, N. and Manning, A.J 2004. An experimental investigation of floc's characteristics in a diffusive turbulent flow. *Journal of Coastal Research*, SI(41), 105-113.
- Kelle, L., Gratiot, N., and Benoît de Thoisy. 2009. Olive ridley turtle *Lepidochelys olivacea* in French Guiana: back from the brink of regional extirpation?. *Oryx*, 43 , pp 243-246
- Kelle, L., Gratiot, N., Nobilos, I., Thérèse, J., Wongsopawiro, R., de Thoisy, B. 2007. Monitoring of the nesting leatherback turtle (*Dermochelys coriacea*): contribution of remote-sensing for real-time assessment of beach coverage in French Guiana. *Chelonian conservation and biology*. 6 (1): 142-147.
- Lefebvre, J.-P., Dolique, F. and Gratiot, N. 2004. Geomorphologic evolution of a coastal mudflat under oceanic influences: an example from the dynamic shoreline of French Guiana. *Marine Geology*. (208), 191-205.
- Némery, J., Mano, V., Navratil, O., Gratiot, N., Duvert, C., Legout, C., Belleudy, P., Poirer, A., Esteves, M. 2010. Retour d'expérience sur l'utilisation de la turbidité en rivière de montagne. Feedback on the use of turbidity in mountainous rivers. *Techniques - Sciences – Méthodes. La revue mensuelle des spécialistes de l'environnement*. Jan-Fev 2010 (1-2).
- Némery, J., Alvarado, R., Gratiot, N., Duvert, C., Mahé, F., Duwig, C., Bonnet, MP., Prat, C., Esteves, M. 2009. Biogeochemical characterization of the Cointzio reservoir (Morelia, Mexico) and identification of a watershed-dependent cycling of nutrients. *AGU fall meeting*, 14-18 Dec. San Francisco.
- Proisy, C., Gratiot, N., Anthony, E. J. Gardel, A., Fromard, F., Heuret, P., 2009. "Mud bank colonization by opportunistic mangroves: a case study from French Guiana using lidar data". *Cont. Shelf Research*, 29, 632-641.
- Sottolichio, A., Hurther, D., Gratiot, N., Bretel, P. Acoustic measurements of turbulence in highly turbid waters of a macrotidal estuary.. *Submitted to Continental Shelf Research*
- Susperregui, A.S., Gratiot, N., Esteves, M. and Prat, C. 2009. A preliminary hydrosedimentary view of a highly turbid, tropical, manmade lake: Cointzio Reservoir (Michoacán, Mexico). *Lakes & Reservoirs : Res & Management* (14), 31-39.

Table des Matières

Première partie : résumé de carrière

A. Curriculum vitae et résumé des activités liées au métier de chercheur

B. Encadrement et activités d'enseignement

C. Publications

Deuxième partie : Synthèse des travaux de recherche

A. Introduction : Les sédiments dans les écosystèmes (au 21^{ème} siècle)

1. Impact des sédiments sur les surfaces et interfaces continentales
2. L'impact des sédiments sur l'écosystème aquatique
3. Impact des sédiments à l'interface Continent-Océan
4. Aléas et risques naturels

B. Processus de dépôt des sédiments cohésifs

1. Processus de dépôt des sédiments cohésifs : notions de physique et de rhéologie
2. Modélisation expérimentale du flux de chute des sédiments cohésifs

C. Vulnérabilité de l'écosystème côtier aux modifications géomorphologiques (Guyane)

1. Migration des bancs de vase le long du plateau des Guyanes, approche géomorphologique
2. Impact des forçages hydrodynamiques sur les bancs de vases en zone proche subtidale
3. Etude du tassement, de la consolidation et colonisation des zones intertidales
4. Impact de la structuration côtière sur l'écosystème
5. Le rôle majeur du cycle de marée à 18.6 ans
6. Comparaison avec l'écosystème côtier du Guyana : clarification des contributions physiques, biologiques et humaines

D. Dégradation des écosystèmes continentaux arides : érosion des sols, flux de sédiments et nutriments associés (Mexique)

1. Préambule
2. Evolution pluriannuelle des régimes hydrologiques et sédimentaires sur les hauts plateaux volcaniques du Mexique : bassin versant de Cointzio, Michoacán
3. Hydrodynamique sédimentaire et biogéochimie du réservoir de Cointzio
4. Hydrologie et dynamique sédimentaire dans le bassin versant

E. Projet de recherche

1. Modélisation hydro sédimentaire et biogéochimie des lacs tropicaux
2. Blocages technologiques et conceptuels quant à l'analyse des flux particuliers dans les bassins versants de petite taille (1-100km²)
3. Echelles de processus et similarité

F. Remerciements

G. Bibliographie

Première partie : résumé de carrière

A. CURRICULUM VITAE

1. Etat Civil

Nicolas GRATIOT
Chargé de Recherche de 1^{ère} classe IRD
Né à Bourges, le 06/07/1974
Deux enfants

Adresse professionnelle :
LTHE, BP 53, 38041 Grenoble Cedex 09
Tel : 04 76 63 56 50, Fax : , Email : nicolas.gratiot@ird.fr

2. Etudes et Diplômes

Doctorat de Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement, Université Joseph Fourier, Grenoble 1: « Etude expérimentale des couches de crèmes de vase turbulentes ». 10 Octobre 2000.

DEA de Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement, Université Joseph Fourier, Grenoble 1 : « Mise au point d'un vélocimètre acoustique pour la mesure de vitesses turbulentes dans les vases fortement concentrées ». Juin 1997.

Langues : Français, Anglais et Espagnol (courant), Allemand (scolaire).

3. Expérience professionnelle

Depuis novembre 2004 : Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement LTHE, UMR 5564 (CNRS, INPG, UJF, IRD). Chargé de recherche IRD (passage en CR1 en 2007). Equipe RIVER.

2007-2009 : Expatriation à l'Université Nationale Autonome du Mexique dans le Centre de Recherche sur les Ecosystèmes (Morélia, Michoacan, Mexique).

2000-2004 : Laboratoire d'Ecologie Littorale sous Influence Amazonienne (ELISA). Centre Institut de Recherche pour le Développement, Guyane.

1996-2000: Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels LEGI, UMR 5519 (CNRS, INPG, UJF). Grenoble, France. DEA et Doctorat.

Eté 1995-1996: Météo-France. Modélisation de la surcôte cyclonique. Iles de la Martinique puis Réunion.

4. Formations complémentaires

60 heures de cours d'espagnol 2006-2007, Université Stendhal, Grenoble.
Moniteur, 1997-2000, Université Joseph Fourier – Grenoble.

5. Prix et Distinctions

Editor's choice AGU Surface Processes pour **Gratiot, N.**, Michallet, H. and Mory, M. 2005, On the determination of the settling flux of cohesive sediments in a turbulent fluid, J. Geophys. Res., 110, C06004.

6. Mobilité

2007-2009 : Affectation à la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México) au CIEco (Centro de Investigaciones en Ecosistemas), Morelia, Mexique.

2005-2006: Missions courtes au Mexique et au Chili auprès de nos partenaires, CIEco et Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo.

2000-2004 : Chercheur post-doctorant puis chercheur IRD, Laboratoire d'écologie littorale, Centre IRD Guyane.

7. Activités d'animation de la recherche

2007-2009 : Formation de techniciens et étudiants du CIEco et du CIGA (Centro de Investigación en Geografía Ambiental) et de l'UMSNH (Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo), Mexique, à la mesure in situ des flux sédimentaires.

Implémentation d'un enseignement spécial au CIEco sur la dynamique sédimentaire (8h).

2007 : Participation au comité d'organisation du colloque international Intercoh'07

2005-2007 : Coresponsable des séminaires LTHE

8. Activités d'évaluation de la recherche

- **Reviewer** pour Catena, Climate Research, Continental Shelf Research, Environmental modeling and software, Geophysical research letter, Journal of Marine System, Journal of Hydrological Engineering, Limnology and Oceanography, Remote Sensing, Revista de biología Tropical, Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection, Sécheresse.
- **Membre élu** de la CSS1 de l'IRD (2008-2011).
- **Evaluateur AERES** pour l'UMR Lisah (2009), l'UMR LPO (2010)
- **Expertise**
 - pour l'European Development Funds (pour le compte du Gouvernement du Guyana sur la vulnérabilité de la côte du Guyana à l'érosion marine.
 - pour l'ANR Vulnérabilité : Milieux et climat,
 - pour le Programme National d'Environnements Côtiers,
 - pour le Département Soutien et Formation de l'IRD :
 - 2010 . un projet de prolongation de Jeune Equipe Associée à l'IRD (Brésil, LMTG)
 - 2010. un projet de Bourse de thèse (Vietnam, LEGOS)
 - 2010. Demande de Chaire croisée IRD (Projet Mordred).
- **Participation aux commissions de recrutements :**
 - Recrutement CR IRD en CSS1 (2008-2011),
 - Chaire d'Excellence UJF/IRD (2010),
 - Concours interne à l'avancement Assistant Ingénieur (2010),
 - MCF 2006, sections 35-36-37 ;

9. Participation à des contrats de recherche

Programmes et contrats auxquels je participe ou j'ai participé :

2007-2012 : Le programme européen DESIRE (Desertification Mitigation and Remediation of Land, coordinateur, Coen Ritsema, Alterra, Pays-Bas) a été financé par l'Union Européenne (FP6 : EU Global Change and Ecosystems Programme) à hauteur de 7 millions d'euros, dont 225 000 euros pour l'IRD (responsable : Christian Prat, IRD) pour 5 ans. Ce programme regroupe plusieurs instituts européens et du pourtour méditerranéen. Plusieurs sites d'études ont été sélectionnés, en Méditerranée, ainsi qu'au Mexique (bassin versant de Morélia), Chine, Australie, Botswana et aux Etats-Unis

2007-2010 : Coordinateur de la partie Mexicaine du programme STREAMS (Sediment Transport and Erosion Across Mountains, responsable scientifique : Michel Esteves), financé par à l'ANR – Programme Blanc 06 pour 3 ans ; coordonné par le LTHE en collaboration avec le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (UMR 1572), EDF – DTG (Département Surveillance – Service Environnement Aquatique) et HYDROWIDE (Grenoble).

2000-2003 : Programme National d'Environnement Côtier, Chantier PNEC Guyane. Co-animation du thème II « Processus liés à la migration des bancs de vases et incidences géomorphologiques »

10. Collaborations nationales et internationales

Collaborations françaises :

AMAP (UMR, 2001-) : Botanique et Bioinformatique de l'Architecture des Plantes (Montpellier). C. Proisy.

BRGM (2001-2004) : Bureau de Recherche Géologique et Minière (Orléans). N. Baghdadi, C. Oliveros.

CEREGE (UMR, 2001-). Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (Aix en Provence). E.J. Anthony.

CNES (2002-2004) : Centre National d'Etudes Spatiales, Division des Infrastructures du Centre National d'Etudes Spatiales de Kourou (Guyane). Contrat de consultance. J.Berault.

Edytem (2006-) : Laboratoire 'Environnement, Dynamique et Territoire de la Montagne' (Chambéry). F. Arnaud.

ELISA (UR, 2000-2004): Ecologie littorale sous Influence Amazonienne. J.P. Lefebvre.

EPOC (UMR, 2000-). Environnements et Paléoenvironnements Océaniques (Bordeaux). A. Sottolichio.

Kwata (2004-2009): Association guyanaise d'étude et de protection de la nature (Guyane). B.de Thoisy, J.Gratiot.

LEGI (UMR, 1997-) : Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (Grenoble). Mory, M., Michallet, H., Hurther, D. Auchère, D.

LGGE (UMR, 2006-) : Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (Grenoble). Magand, O.

LMTG (UMR, 2002-) : Laboratoire des Mécanismes de Transferts en Géologie (Toulouse). J.L. Guyot, M.P. Bonnet.

LSCE (UMR, 2007-) : Laboratoire des Sciences du Climat et Environnement (Gif sur Yvette). Bonte, P., Evrard, O. Lefevre, I.

LTHE (UMR, 2005-) : Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement (Grenoble). Equipe RIVER.

ULCO (2001-): Université du littoral et de la Côte D'Opale (Dunkerque). A. Gardel.

Université de Savoie (Chambéry). J. Poulenard

WWF (2004-2009) : World Wide Fundation. Kelle, L.

Collaborations internationales :

CIECO (2005-2009): Centro de Investigaciones en Ecosistemas (Mexique), F. Garcia Oliva.

CIGA (2007-): Centro de Investigacion en Geografia Ambientale (Mexique). M. Mendoza, E. Lopez-Granados.

UMSNH (2006-) : Universidad Michoacana San Nicolas de Hidalgo (Mexique). I. Israde Alcantara., R. Alvarado, C. Saenz-Romero.

VIMS (2006-2008) : Virginia Institute of Marine Science (USA). J.T. Wells.

University of Plymouth (1998-2005, England). A.J. Manning.

University of Delft, Hollande (1998-2007). J.C. Winterwerp.

Universidade Federal do Rio de Janeiro Brésil (2001-2006). S.B.Vinzon.

B. ENCADREMENT D'ETUDIANTS ET ENSEIGNEMENT

1. Encadrement de master 2, master 1, projet d'ingénieur (PFE), coopérant, Licence

Master 2, PFE, année de césure

1. Jobard, S., C. Minaudo, H. Gally. 2010. Modélisation hydrodynamique du barrage de Cointzio, Mexique. Atelier d'Ingénierie. Grenoble INP.
2. Collet, L. 2009. Water and solid fluxes in the watershed of Cointzio (Michoacan, Mexico) : from flood event to decadal timescales. Projet de Fin d'Etude. Ecole d'ingénieur EOST. Soutenance en septembre 2009. Superviseur : Nicolas Gratiot et Julien Némery.
3. Mahé, F. 2009. A numerical and in situ study of the hydrodynamic of the reservoir of Cointzio (Michoacan, Mexico) and its impacts on water quality. Superviseur : Nicolas Gratiot et Julien Némery. Prix de PFE Hydro21.
4. D. Vinson, 2008. Long-term hydro-sedimentary processes of the watershed of Cointzio, Mexico. Année de césure, AgroParisTech.
5. J. Druais, 2007. Rapid hydro-sedimentary processes of the watershed of Cointzio, Mexico. Année de césure, SupAgro Montpellier.
6. J. Fiot. 2003-2004. Etude de l'influence des temps d'exondation sur la consolidation et la structuration des vases intertidales en Guyane française. DEA Génie Côtier Aménagement du littoral et du plateau continental. Université de Bretagne Occidentale. Major de son DEA.

Coopérants

7. C. Duvert, 2008-2009. Suivi du bassin versant de Cointzio, (Mexique) de l'acquisition des mesures hydrologiques à la valorisation scientifique.
8. T. Maury, 2003-2004. Suivi de l'évolution géomorphologique de la côte guyanaise. Acquisition de mesures et pré-traitement.

Master 1

9. P. Méjean, 2010. Bilan du cycle biogéochimique du bassin versant de Cointzio, Mexique. Master 1, TUE, Univ Joseph Fourier, Grenoble. Superviseur : Nicolas Gratiot et Julien Némery.
10. A. Mercier, 2010. Bilan du cycle biogéochimique du réservoir de Cointzio, Mexique. Master 1, TUE, Univ Joseph Fourier, Grenoble. Superviseur : Nicolas Gratiot et Julien Némery.
11. M. Valmassoni, 2007. Différentes techniques de mesure du taux de sédimentation actuel du réservoir de Cointzio, Mexique. Master 1, Terre Univers Environnement, Université Joseph Fourier.
12. J. Ré, 2007. Différentes techniques de mesure du taux de sédimentation actuel du réservoir de Cointzio, Mexique. Master 1, Terre Univers Environnement, Université Joseph Fourier.

Licenciatura

13. L. Jouglà. 2010. Mesures de granulométrie et spectrophotométrie sur la carotte sédimentaire COI09_1 du réservoir de Cointzio, Mexique. Stage d'excellence, L1, Université Joseph Fourier.
14. C. Jacquet. 2010. Analyse tomographique de la carotte sédimentaire COI09_1 du réservoir de Cointzio, Mexique. Stage d'excellence, L2, Université Joseph Fourier.
15. Fátima Guadalupe. 2008. Hidrodinámica de la cuenca de Cointzio.

2. Encadrements de doctorats

Anne Sophie Susperregui. 2005-2008. Caractérisation hydro-sédimentaire de la retenue de Cointzio (Michoacan, Mexique) comme indicateur du fonctionnement érosif du bassin versant. Directeurs de thèse : N. Gratiot et M. Esteves. Soutenance Octobre 2008.

3. Participations à des jurys de thèse

Participation en tant qu'examineur:

Bernard, M., 2006. Etude des comportements des sols de Marais : Evolution minéralogique, structurale et hydromécanique. (Marais de Rochefort et Marais Poitevin), Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers, 309 p.

5. Activités d'Enseignement, de formation et Vulgarisation (dont conférences grand public)

Enseignement académique, formation

Gratiot, N. 2010. Enjeux environnementaux : Eaux et Sociétés. Travaux Dirigés de Licence (20h). Université Joseph Fourier Grenoble.

Gratiot, N., Duvert, C. 2009. Formation du personnel technique CIGA (Rosaura Paez)

Gratiot, N. 2009. Méthode de jaugeage par dilution. Travaux Pratique de 3ème année d'école d'ingénieur (20h) : Institut Polytechnique de Grenoble.

Gratiot, N. 2009. Cours-Cycle de conférence (8h). Dynamic of sediments and implication for the ecosystems.

Gratiot, N., Duvert, C., Mathuriau, C., 2008. Cours (4h) de TPratique sur la débitmétrie.

Gratiot, N. 1997-2000. Monitorat, Université de Savoie (1/3 de service pendant 3ans).

Gratiot, N., Gardel, 1. et Proisy, C.P. 2004, Dynamique littorale en Guyane Vase-Sable-Mangrove., Formation Rectorat, BRGM-Cayenne, 19 janvier 2004 (4h).

Diffusion du savoir (presse, radio)

Proisy, C. and Gratiot, N. 2009. La mangrove entre deux eaux, Sciences au Sud n°49, Ed. IRD. Avril-mai 2009.

Gratiot, N. 2008. L'influence du cycle des marées, Sciences au Sud n°48, Ed. IRD. Juillet-aout 2008.

Vulgarisation de l'article Gratiot et al. 2008 publié dans Nature Geoscience. Entretien radio sur Radio France Outre Mer et Radio Caracol Miami (en espagnol) ; participation à la rédaction d'une fiche d'actualité scientifique IRD. Information reprise par de nombreux sites web d'écologie et de science (dont wikipedia), article dans la revue Espaces naturels et dans la revue Ekwo.

Gardel, A. et Gratiot, N. 2004. Consultance en Guyane : une approche spatiale de la dynamique littorale », Sciences au Sud n°24, Ed. IRD. Mars-Avril 2004.

6. Conférences

Présentations grand public

Némery, J., Duvert, C., **Gratiot, N.**, 2009. Recursos de agua en la cuenca y la presa de Cointzio. Centro de bachillerato tecnológico agropecuario. 23 oct. 2009, Morelia, Michoacán.

Gratiot, N. and Prat, C. 2009. Dinámica del agua y de los sedimentos en la cuenca de Cointzio: ¿cual estrategia ambiental en los próximos años?. Seminario Centro de Investigaciones en Ecosistemas, junio. 2009, Morelia, Michoacan, Mexico

Gratiot, N. 2007. Hydro-sedimentary processes with an emphasis on the reservoir of Cointzio. Seminario Centro de Investigaciones en Ecosistemas, oct. 2007, Morelia, Michoacan, Mexico.

Gratiot, N. 2006. IRD, a research institute to benefit development (cooperation with Sri Lanka and Africa). Workshop "We Know It, International cooperation with developing countries. 3-7 avril 2006, Grenoble.

Gratiot, N., Maury, T. 2004. Les aventures de Smectite et Kaolinite. 23p. Fête de la Science 2004.

Gratiot, N. 2004. Desenvolvimento Sócio-Econômico e Gestão Ambiental Urbana – A Problemática da Água em Regiões Metropolitanas. Mesa Redonda: Gestão dos Ambientes Naturais Urbanos. Prefeitura do Recife, 5-7 juillet 2004. Recife.

Gratiot, N. 2004. Problématique des dragages des accès maritimes du littoral guyanais. Chambre de commerce et de l'industrie de Guyane, 1 juillet 2004, Cayenne.

Gardel, A. et **Gratiot, N.** 2003. Utilisation de la télédétection spatiale pour suivre la dynamique du littoral guyanais. Conférence maritime Régionale. Cayenne, 15 mai 2003.

Gratiot, N. 2003. Déplacement des bancs de vases et incidences géomorphologiques. Conférence grand public, Mairie de Rémire Montjoly, 20 Février 2003.

Gardel, A., **Gratiot, N.** et Lefebvre, J.P., 2003. Déplacement des bancs de vases et incidences géomorphologiques. Conférence grand public, Collège Kourou 3, 1er avril 2003.

Séminaire de travail

Gratiot, N. 2007. Evolution du trait de côte et forçages hydrodynamiques. Séminaire de restitution BQR Ulco, Wimereux, janvier 2007.

Gratiot, N. 2007. Interaction Houle-Vase le long du littoral Guyanais. Séminaire de restitution BQR Ulco, Wimereux, janvier 2007.

Gratiot, N. et Pellarin, T. 2007. Les outils de bibliographie au LTHE (Web of Science, J Citation Report, Gael ...).

Gratiot, N. 2005. Physique des bancs de vase et colonisation par la mangrove. Présentation orale et animation d'une table ronde. Séminaire Mangrove Guyanaises. 10-12 octobre 2005, Toulouse.

Gratiot, N. 2005. Approche physique de la dynamique sédimentaire – Application aux écoulements chargés. Séminaire LTHE, Grenoble, Janvier 2005.

Gratiot, N. 2001. Etude expérimentale de la formation des couches de crème de vase turbulentes. Séminaire, Université Bordeaux I, Novembre 2001.

Gratiot, N. 2001. Revue des mécanismes physiques en jeu dans la formation et le déplacement des bancs vaseux. Cycle de conférence. IRD Guyane, Cayenne, Avril 2001.

Conférence scientifique invitée

Gratiot, N. 2005. Physical processes involved in the cohesive sediment settling flux. Séminaire au Disaster Prevention Research Institut. Kyoto, Japon, Sept 2005.

Gratiot, N. 2007. Méthodes de mesure du flux de sédimentation actuel (de l'événement de crue à la décade). Séminaire Edytem, Chambéry, Mars 2007.

Communications orales sans proceedings (poster en gris)

2010

Gratiot, N., Navratil, O., Duvert, C., Anguiano Valencia, J.R., Lara Ledesma, B., Némery, J., Prat, C., Legout, C., Belleudy, P., Esteves, M. Monitoring of Suspended Sediment EROSION and transport across mountains: what could be considered as a realistic measuring network? 11th International Symposium on River Sedimentation. South Africa, Sept. 2010.

Duvert, C. and **Gratiot, N.** 2010. Water erosion in small catchments and sediments dynamics in rivers : a case study in Central Mexico. Advances in land degradation research: integrating different approaches, DESIRE UE project conference, 18 May 2010, Enshede, Holland.

Alvarado-villanueva, R., Salles, N., Ortega-Murillo, M.R., Némery, J., **Gratiot, N.**, Hernandez-Morales, R. 2010. Distribucion vertical del fitoplancton durante la epoca de secas en la presa de Cointzio, Michoacan. IX Internacional de la Sociedad Mexicana de Planctología. La Paz, Mexico, Abril 2010.

Alvarado-villanueva, R., Salles, N., Ortega-Murillo, M.R., Némery, J., **Gratiot, N.**, Hernandez-Morales, R. 2010. Distribucion vertical del zooplancton durante la epoca de secas en la presa de Cointzio, Michoacan. IX Internacional de la Sociedad Mexicana de Planctología. La Paz, Mexico, Abril 2010.

Evrard, O., Némery, J., **Gratiot, N.**, Duvert, C., Lefèvre, I., Ayrault, S., Esteves, M. and Bonté, P. Estimation of sediment residence times in subtropical highland catchments of central Mexico combining river gauging and fallout radionuclides. EGU conference, Vienna, Austria (April, 2010).

2009

- Duvert, C., **Gratiot, N.**, Némery, Prat, C., Anguiano, R., Collet, L., Esteves, M. 2009. Interpreting the suspended sediment dynamics in a mesoscale river basin of Central Mexico using a nested watershed approach. AGU fall meeting, 14-18 Dec. San Francisco.
- Némery, J., Alvarado, R., **Gratiot, N.**, Duvert, C., Mahé, F., Duwig, C., Bonnet, MP., Prat, C., Esteves, M. 2009. Biogeochemical characterization of the Cointzio reservoir (Morelia, Mexico) and identification of a watershed-dependent cycling of nutrients. AGU fall meeting, 14-18 Dec. San Francisco.
- Navratil, O., Esteves M., Mano, V., Willmore, S., Némery, N., Legout, C., Poirel, A., **Gratiot, N.**, Belleudy, P. 2009. Uncertainties and spatiotemporal dynamics of suspended sediment flux in the Bléone river basin (Southern French Alps). EGU conference, Vienna, Austria (April, 2009).
- Duvert, C., **Gratiot, N.**, Navratil, O., Esteves, M., Prat, C., Némery, N., Nord, G. 2009. Temporal variations of water and sediment fluxes in the Cointzio river basin, central Mexico. EGU conference, Vienna, Austria (April, 2009).
- 2008
- Susperregui, A.S., **Gratiot, N.**, Esteves, M., Duwig, C. and Prat, C. 2008. The highly turbid tropical reservoir of Cointzio (Mexico). Part II : Sedimentation at various timescale. 11th IASWS symposium, Feb 2008. Australia
- Navratil, O., Esteves, M., Némery, N., Legout, C., Poirel, A., **Gratiot, N.**, Belleudy, P. 2008. Multi-scale survey of Suspended Sediment Concentration in the Bleone river basin (Southern French Alps). EGU conference, Vienna, Austria (April, 2008).
- 2007
- Susperregui, A.S., **Gratiot, N.**, Esteves, M., Duwig, C. and Prat, C. 2008. Remplissage des réservoirs tropicaux à forte sédimentation. Exemple du lac de Cointzio, Michoacán, Mexique. 11ème congrès français de sédimentologie, octobre 2007. Caen, France.
- Aubry, T., Amsterdam, M., **Gratiot, N.**, Monbaliu, J., Naipal, S., Toorman, E., Van Ledden, M., Vaughn, G. and Winterwerp, J.C., 2007. Rheological properties of sediment from Amazon to Orinoco coast (South America) and geomorphologic implications. 8th InterCoh, Brest, September 2007.
- Sottolichio, A., Hurther, D., **Gratiot, N.** and Bretel, P. 2007. Benthic processes in a highly turbid estuary through acoustic velocity measurements. . 8th InterCoh, Brest, September 2007.
- Susperregui, A.S., **Gratiot, N.**, Esteves, M., Duwig and Prat, C. 2007. El funcionamiento hidro-sedimentario de la presa de Cointzio. Simposio : Acciones y resultados para el desarrollo sostenible de la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán. 8 oct 2007, Morelia, Michoacán.
- Gardel, A., Morelle, F., Anthony, E.J., Proisy, C. and **Gratiot, N.** Recent results on hydro-sedimentary and ecological processes that govern the coastal dynamics of French Guiana. 8th International Ecolab Workshop on Amazon Ecosystems, august 2007, Macapa, Brazil.
- Sottolichio, A., Bretel, P., Hurther, D., **Gratiot, N.** 2007. Processus dans la crème de vase par vélocimétrie acoustique. 5^{ème} journée autour de l'estuaire. Novembre 2007.
- 2006
- Susperregui, A.S., **Gratiot, N.**, Esteves, M. and Prat, C. 2006. Hydro-sedimentary characterization of Cointzio and Umécuaro dams. presented in the General Assembly of the European Geophysical Union, 02-07 april 2006, Vienna, Austria.
- Gratiot, N.**, Gardel, A., Proisy, C., Anthony, E.J. 2006. A severe mangrove retreat along the muddy coast of French Guiana. Muddy Coast conference, Porto Alegre, Brazil, November 2006.
- Proisy, C., **Gratiot, N.**, Gardel, A., Anthony, E.J., Heuret, F., Fromard, F. 2006. Relating mudflat elevation to mangrove communities. Muddy Coast conference, Porto Alegre, Brazil, November 2007.
- 2005

Fiot, J., **Gratiot, N.**, Maury, T. 2005. Influência do tempo de exposição sobre a consolidação da lama na Guiana. 11-15 avril. Rio de Janeiro.

2004

Sottolichio, A., Hurter, D., Michallet, H., **Gratiot, N.** and Bretel, P. 2004. Turbulence measurements within fluid mud layers in a macrotidal estuary. Hydrodynamics and morphodynamics in estuaries and coastal seas PECS Workshop. Mexique oct.2004.

Gratiot, N., Gardel, A., Anthony, E.J., Polidori, L. 2004. Evolution géomorphologique des bancs de vase en Guyane : variations spatio-temporelles des vents d'alizés et impacts. 7th International Ecolab Workshop on Amazon Ecosystems, Cayenne, Guyane, December 2004.

Fiot, J. and **Gratiot, N.**, 2004. Influence des temps d'exondation sur la consolidation des vases intertidales en Guyane française. 7th International Ecolab Workshop on Amazon Ecosystems, Cayenne, Guyane, December 2004.

Gardel A., Gratiot N., Polidori L., Heidekamp C., Bérault J., 2004. Analyse de l'évolution de l'effort de dragage du chenal du Kourou. 7th International Ecolab Workshop on Amazon Ecosystems, Cayenne, Guyane, December 2004.

Gratiot, J., **Gratiot, N.**, de Thoisy, B. 2004. Evolution de la distribution des pontes de tortues marines sur l'île de Cayenne (Guyane française) lors de la migration d'un banc de vase. 7th International Ecolab Workshop on Amazon Ecosystems, Cayenne, Guyane, December 2004.

2003

Gratiot N., J.P. Lefebvre, N. Baghdadi, C. Oliveros, 2003, Structuration des bancs de vase : rôle des barres vaseuses et hypothèses de fonctionnement. 9ème congrès des sédimentologues français, ASF, Bordeaux, 14-16 octobre 2003.

Lefebvre, J.P., **Gratiot, N.**, Aubry, T. and Dolique, F. 2003. Elements of structuration of the French Guianese coastal areas under the influence of mudbanks migration. XXXème colloque de l'Union des Océanographes de France, 8-10 septembre 2003, Marseille, France.

Lefebvre, J.P., **Gratiot, N.**, Aubry, T. and Dolique, F. 2003. Exemples de structuration du littoral guyanais sous l'influence de la migration des bancs de vase. 9ème congrès des sédimentologues français, ASF, Bordeaux, 14-16 octobre 2003, poster.

2002

Gratiot N., J.P. Lefebvre. 2002. Dynamic of mud banks in French Guiana : an experimental investigation of sediment settling processes. presented in the XXVII General Assembly of the European Geophysical Society, 21-26 april 2002, Nice France.

2001

Dolique, F., Lefebvre, N. and **Gratiot, N.** 2001. Dynamique à moyen et court terme de la flèche vaseuse de Kaw." Présenté dans le XXVII colloque de l'Union des Océanographes de France, Villeneuve d'Ascq, Septembre 2001.

C. PUBLICATIONS

1. Revues internationales à comité de lecture

Articles en préparation.

1. Gratiot, N. and Anthony, E.J. Structuration of the coast of Guyana's : interaction between physical, biological and human induced processes. *In prep.*
2. Susperregui, A.S., **Gratiot, N.**, Druais, J. and Esteves, M. The highly turbid tropical reservoir of Cointzio (Michoacan, Mexico) : Sedimentation at various timescales. *To be resubmitted.*

Articles soumis, en révision

1. Duvert, C., **Gratiot, N.**, Némery, J., Burgos, A., Navratil, O. Sub-daily variability of suspended sediment fluxes in small mountainous catchments-Implications for community-based river monitoring. *Submitted to HESS*
2. Lopez-Granados, E., Gratiot, N., Mendoza, M.E., González, D.I., Arnaud, F., Magand, O., Prat, C., Esteves, M. Analysing some relationships between land cover, land use change and hydrological processes at watershed level: A multitemporal study in the Cointzio watershed, Mexico. Submitted to Water Resources Management
3. Sottolichio, A., Hurther, D., **Gratiot, N.**, Bretel, P. Acoustic measurements of turbulence in highly turbid waters of a macrotidal estuary.. *Submitted to Continental Shelf Research*
4. Gardel, A. and **Gratiot, N.**, L'érosion du littoral guyanais, état des connaissances. Chapitre de livre.

Articles à comité de lecture publiés, sous presse (Indexée CC sauf en Gris)

2010

Gratiot, N., Duvert, C., Collet, L., Vinson, D., Némery, J., Saenz-Romero, C. 2010. Increase in surface runoff in the central mountains of Mexico: lessons from the past and predictive scenario for the next century. *HESS* (14) 2, 291-300.

Duvert, C., **Gratiot, N.**, Evrard, O., Navratil, O., Némery, J., Prat, C. and Esteves, M. Drivers of erosion and suspended sediment transport in three headwater catchments. *Geomorphology* 123 (3-4), 243-256..

Evrard, O., Némery, J., **Gratiot, N.**, Duvert, C., Ayrault, S., Lefèvre, I., Poulenard, J., Prat, C., Bonté, P. and Esteves, M., Sediment dynamics during the rainy season in tropical highland catchments of central Mexico using fallout radionuclides. *Geomorphology* 124(1-2), 42-54.

Anthony, E.J., Gardel, A., **Gratiot, N.**, Proisy, C., Allison, M.A., Dolique, F. and Formard, F. The Amazon-influenced muddy coast of South America: A review of mud bank-shoreline. *Earth Science Review in press.*

Navratil, O., Esteves, M., Legout, C., **Gratiot, N.**, Willmore, S., Némery, J., Grangeon, T. Scaling suspended sediment monitoring uncertainties in a highly erodible mountainous catchment. Accepted, minor revisions.

Némery, J., Mano, V., Navratil, O., **Gratiot, N.**, Duvert, C., Legout, C., Belleudy, P., Poiriel, A., Esteves, M. 2010. Feedback on the use of turbidity in mountainous rivers. Retour d'expérience sur l'utilisation de la turbidité en rivière de montagne. Techniques - Sciences – Méthodes. La revue mensuelle des spécialistes de l'environnement. Jan-Fev 2010 (1-2).

2009

Susperregui, A.S., Gratiot, N., Esteves, M. and Prat, C. 2009. A preliminary hydrosedimentary view of a highly turbid, tropical, manmade lake: Cointzio Reservoir (Michoacán, Mexico). *Lakes & Reservoirs : Res & Management* (14), 31-39.

Proisy, C., **Gratiot, N.**, Anthony, E. J. Gardel, A., Fromard, F., Heuret, P., 2009. "Mud bank colonization by opportunistic mangroves: a case study from French Guiana using lidar data". *Continental Shelf Research*, 29, 632-641.

Kelle,L, **Gratiot, N.**, and Benoît de Thoisy (2009). Olive ridley turtle *Lepidochelys olivacea* in French Guiana: back from the brink of regional extirpation?. *Oryx*, **43** , pp 243-246

2008

Gratiot, N., Anthony, E., Gardel, A., Gaucherel, C., Proisy, C. and Wells, J.T.. 2008. Significant contribution of the 18.6 year tidal cycle to regional coastal changes. *Nature Geoscience*. 1, 169-172.

Anthony, E.J., Dolique, F., Gardel, A., **Gratiot, N.**, Proisy, C. and Polidori, L. 2008.. Nearshore intertidal topography and topographic-forcing mechanisms of an Amazon-derived mud bank in French Guiana. *Continental Shelf Research*. 28, 813-822.

2007

Gratiot, N., Gardel, A. and Anthony, E.J., 2007. Trade-wind waves and mud dynamics on the French Guiana coast, South America: input from ERA-40 wave data and field investigations. *Marine Geology*. 236, 15-26.

Gratiot, N. and Manning, A.J. , 2007. A Laboratory Study of Dilute Suspension Mud Floc Characteristics in an Oscillatory Diffusive Turbulent Flow, SI 50 (Proceedings of the 9th International Coastal Symposium), 1142 – 1146. *Journal of Coastal Research*.

Kelle, L., **Gratiot, N.**, Nobilos, I., Thérèse, J., Wongsopawiro, R., de Thoisy, B. 2007. Monitoring of the nesting leatherback turtle (*Dermochelys coriacea*): contribution of remote-sensing for real-time assessment of beach coverage in French Guiana. *Chelonian conservation and biology*. **(6)**1,142-147.

2006

Gratiot, N., Gratiot, J., de Thoisy, B., Kelle, L. 2006. Estimation of marine turtles nesting from incomplete data ; statistical adjustment of a sinusoidal function. *Animal Conservation*. 9, 95-102.

Fiot, J., and **Gratiot, N.** 2006. Structural effects of tidal exposures on mudflats along the French Guiana coast (N.E. South America). *Experimental and field approaches. Marine Geology*. 228, 25-37.

Gardel, A. and **Gratiot, N.**, 2006. Monitoring of coastal dynamics in French Guiana from 16 years of SPOT satellite images,. *J.Coastal Res SI* (39). 1503-1506.

2005

Gratiot, N., Michallet, H. and Mory, M. 2005, On the determination of the settling flux of cohesive sediments in a turbulent fluid, *J. Geophys. Res.*, 110, C06004

Gardel, A. and **Gratiot, N.**, 2005. A satellite image-based method for estimating rates of mud bank migration, French Guiana, South America. *J.Coastal Res*, 21(4), 720-728.

2004

Gratiot, N. and Manning, A.J 2004. An experimental investigation of floc's characteristics in a diffusive turbulent flow. *J.Coastal Res.*, SI(41), 105-113

Lefebvre, J.-P., Dolique, F. and **Gratiot, N.** 2004. Geomorphic evolution of a coastal mudflat under oceanic influences: an example from the dynamic shoreline of French Guiana. *Marine Geology*. 208: 191-205.

Baghdadi, N., **Gratiot, N.**, Oliveros, C., Lefebvre, J.-P., Bourguignon, A. 2004. Coastline and mudbank monitoring in French Guiana Contributions of radar and optical satellite imagery. *Canadian J. Remote Sensing*. 30 No2, 109-122. (IF 1.4)

Baghdadi, N., David, A., Oliveros, C., **Gratiot, N.**, 2004. Apport de l'imagerie spatiale optique et RADAR pour la cartographie des bancs de vase en Guyane française. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*. Vol 175. Article diffusé dans le journal algérien *Bulletin des Sciences Géographiques* sur demande de l'éditeur.

2000

Gratiot, N., Mory, M. and Auchère, D., 2000. An acoustic Doppler velocimeter (ADV) for the characterisation of turbulence in concentrated fluid mud. *Continental Shelf Research*, 20, 1551-1567.

Gratiot, N., 2000. Etude expérimentale de la formation des couches de crème de vase turbulentes. Thèse, UJF Grenoble.

2. Chapitre d'Ouvrages

Gardel, A. and **Gratiot, N.**, L'érosion du littoral guyanais, état des connaissances. Soumis.

Gratiot, N. and Manning, A.J., 2008. Chapitre 5. Flocculation processes in concentrated benthic suspension layer (CBS) using a laboratory diffusive turbulent grid tank. In: T. Kudusa, H. Yamanishi, J. Spearman and J.Z. Gailani, (eds.), *Sediment and Ecohydraulics - Proc. in Marine Science, INTERCOH 2005*, Amsterdam: Elsevier, Volume 9, 2008, pp 53-67.

Mory, M., **Gratiot, N.**, Manning, A.J. and Michallet, H., 2002. CBS layers in a diffusive turbulence grid oscillation experiment. In : Winterwerp, J.C. and Kranenburg, C., eds., *Fine sediment dynamics in the marine environment*, Elsevier Science B.V., 139-154

J.C. Winterwerp, A.W. Bruens, **N. Gratiot**, C. Kranenburg, M. Mory, E.A. Toorman., 2002. Dynamics of Concentrated Benthic Suspension layers. In : Winterwerp, J.C. and Kranenburg, C., eds., *Fine sediment dynamics in the marine environment*, Elsevier Science B.V., 41-55.

3. Conférences avec proceeding

Gratiot, N., Navratil, O., Duvert, C., Anguiano Valencia, J.R., Lara Ledesma, B., Némery, J., Prat, C., Legout, C., Belleudy, P., Esteves, M. 2010. Monitoring of Suspended Sediment erosion and transport across mountains: what could be considered as a realistic measuring network? 11th International Symposium on River Sedimentation. South Africa, Sept. 2010.

Gratiot, N., Gardel, A. and Polidori, L. 2005. Remote sensing based bathymetry on the highly dynamic Amazonian coast. 9th International Coastal Symposium, 5-8 june 2005. Hofn, Iceland, CD Rom, 13p.

Gardel, A., Proisy, C., **Gratiot, N.**, Polidori, L., de Coligny, F., 2002. Du banc de vase à la mangrove : apport d'une série d'images SPOT 1986-2001 pour le suivi de la dynamique du littoral guyanais, VIth workshop ECOLAB, Belém-PA, Brésil, 13p.

Dolique, F., Lefebvre, N. and **Gratiot, N.** 2002. Evolution géomorphologique de la flèche vaseuse estuarienne de Kaw, Guyane française. *Geomorphology : from expert opinion to modeling*. Atribute to Professor Flageollet, CERG ed., pp 313-316.

Gratiot, N. and Mory, M., 2000, "Wave induced sea-bed liquefaction with application to mine burial." pp 600-605 of the: Tenth International Off-shore and Polar Engineering conference, vol. 2. ISOPE 2000.

4. Rapports de recherche

- Susperregui, A.S., **Gratiot, N.**, Esteves, M., and Prat, C., C. 2006. Caractérisation hydro-sédimentaire des retenues de Cointzio et d'Umecuario (Mexique). Rapport de la mission du 23 mai au 7 juin 2006.
- Susperregui, A.S., **Gratiot, N.**, Esteves, M., Prat, C. and Duwig, C. 2006. Caractérisation hydro-sédimentaire des retenues de Cointzio et d'Umecuario (Mexique). Rapport de la mission du 4 au 15 décembre 2005. 17 pages.
- Gardel, A. et **Gratiot, N.** 2004. Dynamique littorale et impacts socio-économiques en Guyane française Approche par télédétection spatiale. Restitution finale, consultance N° 02/CNES/0814/00. Juin 2004. 54p.
- Gardel, A. et **Gratiot, N.** 2003. Dynamique littorale et impacts socio-économiques en Guyane française Approche par télédétection spatiale. Rapport intermédiaire, contrat de consultance N° 02/CNES/0814/00. Oct. 2003. 28p.
- Mory, M. and **Gratiot, N.**, 1999. Etude d'analyse de phénomènes naturels liés à l'enfouissement de mines par liquéfaction d'un sol sableux. Rapport au Groupe d'Etudes Sous-Marines de l'Atlantique (GESMA, DGA, France).

Deuxième partie :
Synthèse de travaux de recherche

A. Introduction :

Les sédiments dans les écosystèmes (au 21^{ème} siècle)

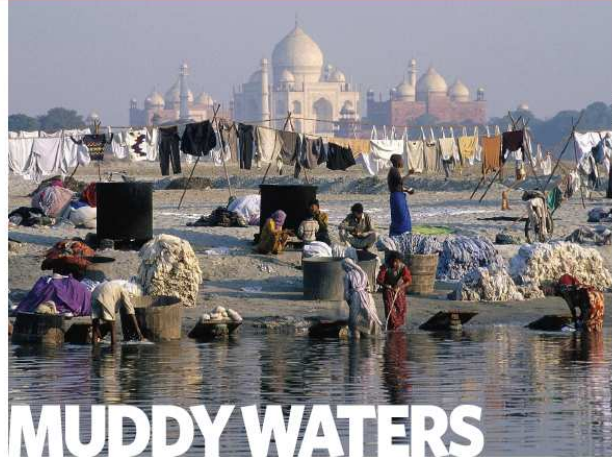
Les flux des sédiments, depuis les massifs montagneux jusqu'aux océans interagissent notablement avec les écosystèmes et l'activité humaine (Figure A.1). A titre d'exemple, les lits majeurs des rivières sont fréquemment cultivées du fait de l'enrichissement naturelle des plaines alluviales par des sédiments riches en éléments nutritifs lors des crues. De nombreuses maisons contemporaines ou passées sont construites en utilisant l'argile (notamment au Maroc, Yemen). Au 21^{ème} siècle, ces maisons et lieux de travail accueillent plus de 3 milliards de personnes chaque jour. Les écosystèmes de marais jouent également un rôle très important pour le stockage et la purification des eaux. Les mangroves, sur substrat vaseux sont actuellement reconsidérées, du fait de leurs richesses écologiques, économiques, éco touristiques ainsi que du fait de leur rôle dans la lutte contre l'érosion côtière (Barbier et al., 2008).

Les dommages que les sédiments cohésifs font subir à l'Homme sont tout aussi nombreux. Nous pourrions parler des crues éclair, des laves torrentielles où encore des problèmes de flux et relargage de pollution. A titre d'exemple, des taux de polychlorobiphényles 40 fois supérieurs aux normes admises par l'Organisation mondiale de la santé (OMS, pour une consommation quotidienne) ont été trouvés dans les sédiments du Rhône. Ceci implique une interdiction de la pêche et la consommation sur plusieurs centaines de kilomètres depuis 2007 (Laimé, 2007).

D'un point de vue général, les impacts peuvent être classés en quatre ensembles qui sont :

- Impact des sédiments sur les surfaces et interfaces continentales : Erosion des sols et perte de terres cultivables (impacts locaux, sécurité alimentaire), contribution significative au cycle du carbone (et autres nutriments) à l'échelle globale.
- Impact des sédiments sur les écosystèmes aquatiques : atténuation de la lumière liée à la turbidité, transport et fixation de métaux lourds et autres polluants (PCB).
- Impact des sédiments à l'interface Continent-Océan : Erosion des côtes par effets naturels et anthropiques (rupture du flux sédimentaire par les barrages et subsidences induites des deltas.
- Aléas et risques naturels : Coulées de boues et laves torrentielles

Ce document, portera plus particulièrement sur les trois premiers groupes du fait de mes activités de recherche antérieures.



India's population is growing, and its water supplies are not keeping pace. Can an ambitious scheme to connect up the country's rivers slake the nation's deepening thirst? **Daemon Fairless** investigates.



Fig. A.1. Scènes de vie illustrant parfaitement les interactions quotidiennes entre l'homme et les sédiments cohésifs. A gauche, lessive le long d'un fleuve Indien (Nature, vol 452, 20mars 2008). A droite, zone de culture de maïs en bordure d'une ravine d'érosion sur les sols volcaniques du bassin versant de Huertitas (Mexique, cliché J.Poulenard).

1. Impact des sédiments sur les surfaces et interfaces continentales

Comme le montre la figure A.2., pas moins de $1580 \cdot 10^9$ tonnes de carbone (GtC) seraient stockées dans les sols, une quantité 10^3 fois plus grande que les flux Océan-Atmosphère-Géosphère qui focalisent toute notre attention du fait de leurs impacts sur le dérèglement climatique. Ainsi, l'émission liée à l'activité humaine s'élève à environ 7 GtC, la moitié restant stockée dans l'atmosphère. L'érosion des sols, même sur quelques millimètres d'épaisseur contribue notablement à la modification de ces flux. Il en est de même de la transformation des forêts et zones enherbées en surfaces agricoles. Au total, les changements d'usage des sols contribuent à environ 1.6GtC par an. Les flux de carbone associés aux flux sédimentaires des rivières constituent également un acteur central des échanges entre le continent et les océans.

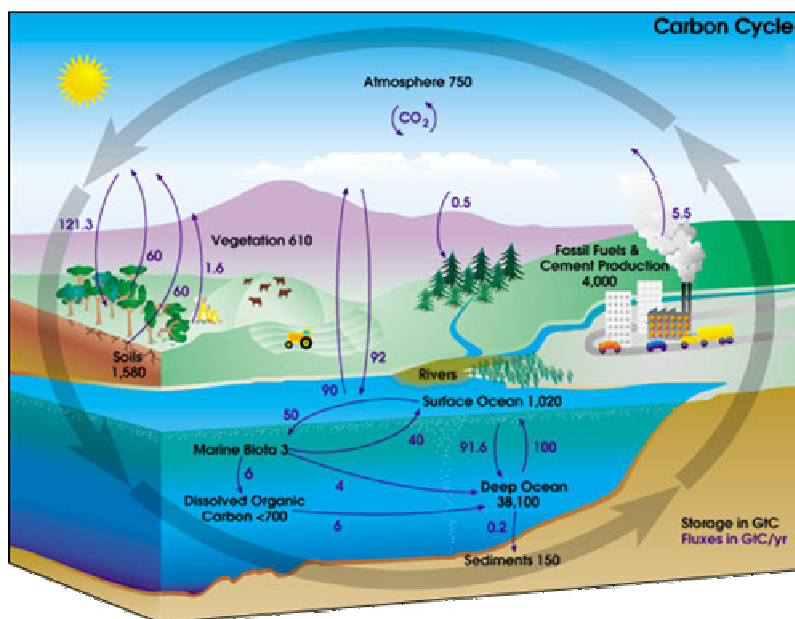


Fig. A.2. A gauche, zones puits, sources et flux contributifs du cycle du carbone (site internet NASA : http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/carbon_cycle4.php). A droite, figure d'érosion en rigole dans un interbank de culture.

2. L'impact des sédiments sur l'écosystème aquatique

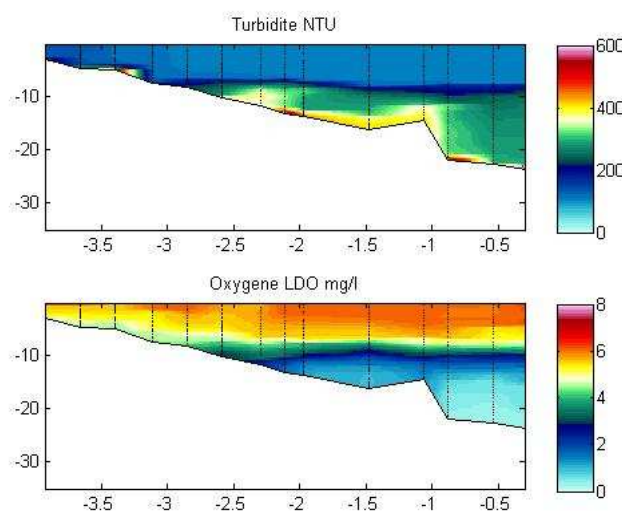
L'érosion des sédiments fins sur les bassins versants conduit à une très forte augmentation de la turbidité dans les écosystèmes aquatiques. Cette turbidité peut être restreinte aux phases de crues, l'eau retrouvant sa transparence en fin d'évènement comme c'est le cas de nombreuses rivières de montagnes dont celles que nous suivons sur le bassin versant de la Bléone. Selon la nature des sols, le forçage hydrométéorologique et les conditions géomorphologiques des bassins versants, la turbidité peut être quasi-permanente, c'est le cas du bassin versant de Cointzio (Fig. A.3, à gauche). En limitant la pénétration de la lumière, la charge turbide réduit les processus de photosynthèse et peut conduire à des phases d'anoxies, notamment dans les systèmes lacustres (Fig. A.3, à droite).

Il est intéressant de noter que les composantes végétales et animales de l'écosystème participent activement à la dynamique des sédiments. A titre d'exemple, citons l'impact des biofilms sur la capacité de floculation des sédiments cohésifs (Gratiot and Manning, 2004), le rôle de la mangrove comme stabilisateur de côtes vaseuses (Barbier et al., 2008 ; Furukawa et al., 1997) ou encore l'impact des saumons sur l'érosion des sédiments dans les rivières (Encarté A.3).

Du fait de leurs propriétés d'adsorption, les sédiments fins érodés sur les bassins versants peuvent transporter des nutriments (nitrate, phosphate ...) d'origine agricoles ou urbaines (les lessives avec phosphate sont encore utilisées dans de nombreux pays). Ces derniers peuvent conduire à des blooms algaux qui vont limiter plus encore la pénétration de la lumière et conduire à des phases d'eutrophisation. Cette situation a pu être mise en évidence dans le réservoir de Cointzio lors de nos études au Mexique (Némery et al., 2009) et sera présentée dans la section D. Les répercussions de ce type de phases sont importantes non seulement pour l'écosystème aquatique mais également toutes les activités socio-économiques associées (pêche, tourisme, production d'eau potable, d'hydro-électricité ...).

Selon l'Agence européenne, 73% des cours d'eau seraient touchés par des phases d'eutrophisation. Ce fléau concerne également les zones côtières avec des exemples particulièrement médiatisés le long des côtes bretonnes lors des phases de marées vertes. Un apport excessif en nutriments, couplé à des conditions hydrométéorologiques propices, conduisent à la prolifération d'*Ulva armoricana* et *Ulva rotundata* et à un déséquilibre parfois catastrophique de l'écosystème.

A l'échelle de l'océan côtier, les zones affectées et considérées comme mortes ont crû exponentiellement depuis les années 60 sous l'impact anthropique pour atteindre 245 000 km² aujourd'hui (Diaz and Rosenberg, 2008).



distance en km et profondeur en m

Fig. A.3 .A gauche : Eaux très turbides en phase de décrue sur le bassin versant de Potrerillos (Mexique). A droite : réservoir de Cointzio (Mexique) en aval du bassin versant de Potrerillos. La coupe verticale du profil de turbidité (en haut) et d'oxygène dissous (en bas) montre l'impact de la turbidité sur l'écosystème. La pénétration de lumière est limitée à une vingtaine de centimètres (disque secchi) pour une turbidité de surface voisine de 120 NTU. Un courant hyperturbide (jusqu'à 420 NTU) est également visible. La consommation de l'oxygène dans la colonne d'eau conduit à une phase anoxique pour les profondeurs excédants 15 mètres.

3. Impact des sédiments à l'interface Continent-Océan

D'un point de vue quantitatif, l'impact de l'aménagement des bassins versants par l'Homme a tout d'abord conduit à une augmentation des apports sédimentaires naturels à l'Océan du fait de l'érosion des sols ($+2.3 \pm 0.6$ milliards de tonnes/an) ; et conduit désormais à une diminution (1.4 ± 0.3) du fait du piégeage des sédiments dans les barrages (Syvitski et al., 2005).

Les côtes sont désormais globalement soumises à un déficit sédimentaire, les barrages capturant jusqu'à 30% des flux de sédiments produits sur les massifs (Vorosmarty et al., 2003). A cette diminution, se superposent des processus de subsidence dans la majorité des grands deltas vaseux (Day and Giosan, 2008 ; Syvistki et al., 2009). Cela du fait d'un pompage important d'eau, de gaz et de pétrole dans les couches sédimentaires côtières. Les évolutions climatiques en cours, de part leur impact sur les crues, les tempêtes et l'augmentation du niveau des mers risquent d'accroître encore la vulnérabilité des écosystèmes côtiers.

Il est à noter que si bon nombre de régions souffrent d'érosion, notamment dans les grands deltas asiatiques aménagés (Dai et al., 2008 ; Yang et al., 2007) ; la sédimentation de vase en zones côtières peut nuire à certains écosystèmes, notamment les zones récifales (Encarté A.1).

4. Aléas et risques naturels

Pour finir, il convient de rappeler que les flux de sédiments cohésifs dans les rivières de montagne peuvent prendre des proportions particulièrement dévastatrices. En effet, le transport de sédiments cohésifs à très grande concentration ($>500\text{g/l}$) modifie les propriétés rhéologiques

du fluide et accroît considérablement ses capacités de portance. Les phénomènes de laves torrentielles sont capables de transporter des voitures ou blocs de pierre de plusieurs m³ sur de grandes distances, causant des dégâts humains et matériels énormes. Ces phénomènes sont bien connus des régions tropicales volcaniques sous le nom de Lahars. Sous l'action de fortes précipitations, les éjections de cendres volcaniques forment un fluide très visqueux (Lahars) dont l'écoulement vers les zones habitées conduit à de nombreux dommages. Les laves torrentielles et autres coulées de boues se produisent également sous des latitudes tempérées, notamment en Suisse ou en France (Encarté A.2.).



Mud Damages Hawaiian Coral Reefs

2000 – 2004

Scientists from the USGS, the University of Hawaii (UH), and the University of Washington (UW) are studying the coral reefs near several Hawaiian islands. Using air photos, satellite photos, underwater photos, and underwater instruments, we've found that mud washed offshore by large storms can damage coral reefs. Corals need sunlight and clear water to grow. When sunlight is blocked by muddy water, the corals stop growing and sometimes die.



Air photo of West Maui



Healthy coral reef



Mud-damaged coral reef



Hawaiian Islands

Healthy coral reefs provide homes for thousands of different plants and animals; storm protection for beaches and coastal communities; recreation for scuba divers and beachcombers; medicines for cancer and AIDS; and local jobs in tourism and fishing. If local land use managers reduce the mud washed offshore, coral reefs will stay healthier.

Coral Reef Sediment Team

Miko Field, USGS
Miko Bohner, USGS
Eric Brown, UH
Pat Chavez, USGS
Scott Colhoun, USGS
Susie Cochran-Morquest, USGS
Bruce Jettie, USGS
Paul Jokiel, UH
Josh Logan, USGS
Andrew Ogston, UW
Greg Pinink, USGS
Rick Randigs, USGS
Curt Storlazzi, USGS



Curt Storlazzi and Rick Randigs installing underwater instrument

More information on the web: <http://walrus.wr.usgs.gov/posters>

Encarté A.1. Dégradation des récifs coralliens par des régimes de sédimentation vaseuse sur l'archipel d'Hawaï, Etats Unis.



(source: Agence photographique Hug, Barberèche).



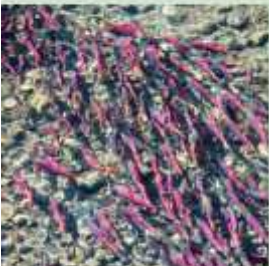
AP/Lionel Cironneau.

Encarté A.3. Impact de la migration des saumons sur le flux sédimentaire dans la rivière Fraser, Canada. Nature Géosciences 1, avril, 2008.

Encarté A.2. A droite. En haut, lave torrentielle catastrophique 2005, Glyssibach Brienz. Le coût total de l'évènement s'est élevé à 500M€, 900 villages furent affectés et huit personnes tuées. En bas. Des personnes devant un camping ravagé par les intempéries, le 16 juin 2010, au Muy, dans le Var (le premier bilan fait état de 20 morts).

GEOMORPHOLOGY

Muddying the waters



The annual migration of salmon upstream is a spectacular sight to tourists and hungry bears alike (see image). Their arduous swim is largely seen as the

response to an internal drive to reproduce, but the effects of the journey go beyond the procreation of this predatory fish.

Once the salmon have arrived at their upstream spawning areas, hard-working female fish use their fins and bodies to mobilize sediments lining the streambed, digging small holes, or redds, of up to 50 cm deep in which they lay their eggs. In particularly popular mating areas, the redds can disturb the entire channel bed.

Although the hummocky surface of the nests is readily visible from August to May, the impact of the redds on overall sediment transport within salmon-filled streams has been unclear. Marwan Hassan at the University of British Columbia, Canada, and colleagues therefore used bed-load traps and magnetically tagged particles to analyse the effects of salmon

activity in the Fraser River basin, Canada (*Geophys. Res. Lett.* 35, L04405; 2008).

In individual waterbeds, salmon were responsible for up to 60% of sediments mobilized each year, mainly in the form of clays, silts and sands, which are easily resuspended by the digging fish. On average, salmon moved over half as much of these sediments as flood events did during the five years of the study. In years with minimal flooding, salmon were actually the primary drivers of sediment movement.

In their quest to dig a home for their offspring, salmon become a first-order control on sediment transport in their home streams. The relationship between habitat and biology is clearly not a one-way street.

Alicia Newton

B. Dynamique des sédiments cohésifs

1. Processus de dépôt des sédiments cohésifs : notions élémentaires de physique et de rhéologie

Contrairement aux sédiments grossiers (sables, galets), les sédiments fins (argiles, limons) possèdent des caractéristiques électrochimiques propres à la formation d'agrégats ou flocs (Fig. B.1.1). Dans les écosystèmes naturels, ces caractéristiques sont exacerbées par les sels dissous et l'activité biologique (Migniot, 1968 ; Gratiot and Manning, 2004 ; Maggi, 2009) .

Table 4. Grain-size scales--soil classification (modified from U.S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 1977).

Unified Soils Classification	ASTM Mesh	mm Size	Phi Value	Wentworth Classification
COBBLE		256.0	-8.0	BOULDER
		76.0	-6.25	COBBLE
COARSE GRAVEL		64.0	-6.0	
		19.0	-4.25	PEBBLE
FINE GRAVEL		4.75	-2.25	
SAND		5	-2.0	GRAVEL
		10	-1.0	very coarse
		18	0.0	coarse
		25	0.5	medium
		40	0.42	fine
		60	0.25	very fine
		120	0.125	
		200	0.074	
SILT		230	0.062	SILT
		0.0039	8.0	CLAY
CLAY		0.0024	12.0	COLLOID

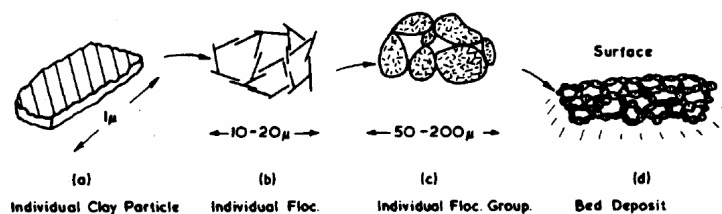
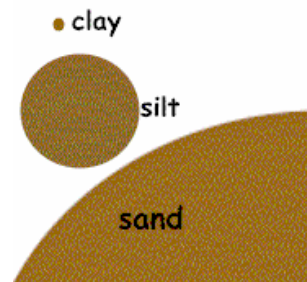


Fig. B.1.1. A gauche : Classification granulométrique des sédiments minéraux. En haut à droite : tailles relatives d'une particule idéalisée d'argile, de limon, de sable. En bas, à droite. Du feuillet élémentaire d'argile au floc au macro-floc à la matrice de sédiments cohésifs fraîchement déposée. D'après McDowel et O'Connor, 1977.

Bien que tous les sédiments possèdent une masse volumique quasi-identique (de l'ordre de $2500\text{--}2650\text{kg/m}^3$), l'agglomération des particules élémentaires d'argiles conduit à la formation de flocs ou macro-flocs extrêmement poreux, contenant fréquemment jusqu'à 95% d'eau (Fig.B.1.1. en bas à droite).

En milieu naturel, nombre de processus hydro-sédimentaires interagissent et compliquent notablement la paramétrisation à base physique des évolutions géomorphologiques (Fig. B.1.2). Parmi les principaux processus, figurent les forçages hydrométéorologiques et océaniques (houles, courant, marée, vent, pluie), les processus hydro sédimentaires au sein de la colonne fluide (floculation, désagrégation, chute libre, chute entravée, tassement, entraînement) et les processus hydro sédimentaires de fond (consolidation, liquéfaction, érosion). Comme nous le verrons dans la suite de ce manuscrit, certains de ces processus se font en interaction directe avec la biologie, notamment la floculation ou la consolidation des vases en zones intertidales.

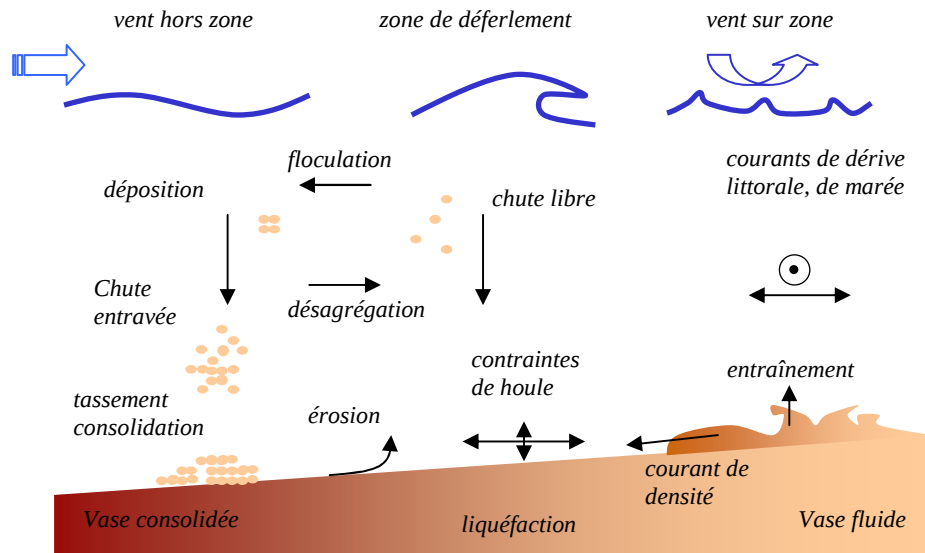


Fig B.1.2- Schéma conceptuel des mécanismes physiques impliqués dans la migration des bancs de vase (prés. IRD Cayenne, Gratiot 2001)

Les gammes de concentrations et de régimes turbulents au sein desquels évoluent les sédiments cohésifs en milieu naturel (rivière, lac, estuaire, côte) ne permettent pas d'aborder la dynamique sédimentaire à partir d'un seul modèle analytique. Ainsi, l'approche du problème se fait de manière discrète, en considérant un milieu diphasique pour les concentrations inférieures à 1 g/l ; puis en établissant des modèles rhéologiques de mécanique des milieux continus lorsque les concentrations excèdent 100g/l (Fig. B.1.3).

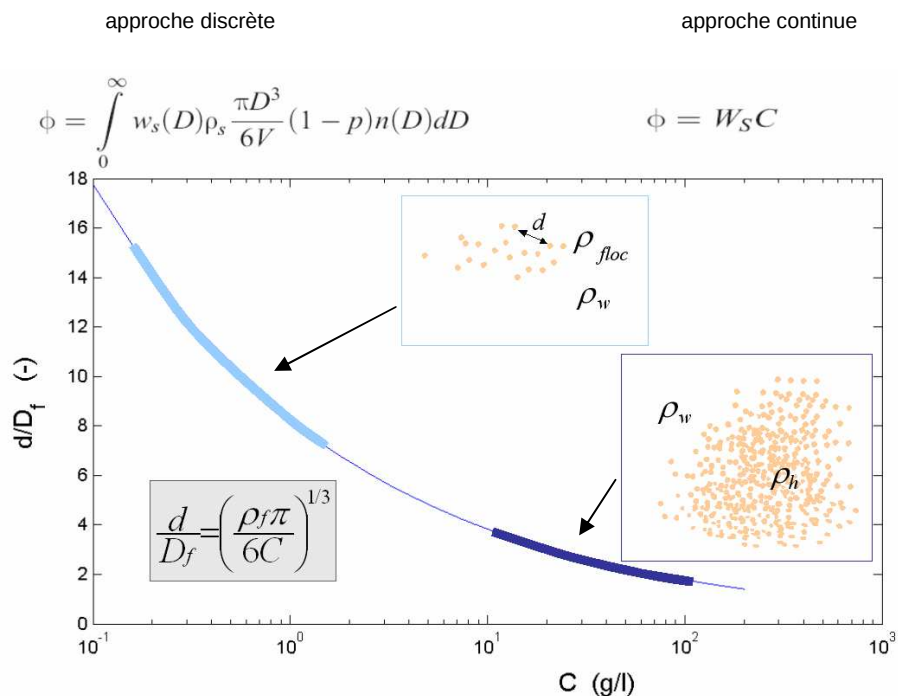


Fig. B.1.3. Description de la diminution de la distance inter-flocs avec la concentration Il existe un seuil (entre 1 et 10 g/l) au delà duquel l'approche continue se substitue à l'approche discrète (séminaire sur invitation au Disaster Prevention Res. Institut, Kyoto, Japon, Sept 2005).

La dynamique de floculation désagrégation est gouvernée par différents facteurs dont deux principaux, à savoir la concentration massique (et/ou volumique) en sédiment et le niveau de turbulence de l'écoulement (Fig. B.1.4., Dyer, 1989). Pour des concentrations en matière solide C dans la gamme $[0.1-10]$ g l⁻¹, la diminution de la distance inter-floc ($d/D_f \sim O(10)$) entraîne une augmentation du nombre de chocs et favorise la floculation (Fig.B.1.4., d'après Droppo, 2005). Pour la même raison, l'augmentation du cisaillement turbulent favorise également la floculation. Lorsque le niveau de turbulence augmente encore, les plus petites échelles de la turbulence (cascade de Kolmogorov) se réduisent et deviennent de la dimension des floes. Les tourbillons les plus petits brisent facilement les floes car leur structure est lâche (Kranenburg, 1999).

Les développements instrumentaux (optique, laser et holographie) ont permis d'adopter une approche 'discrète' reposant sur les propriétés individuelles de chaque floc : sphéricité, taille, porosité, dimension fractale, vitesse de chute (Fenesty et al., 1994, Droppo, 2005, Mikkelsen et al., 2005, Maggi, 2006, Jouon et al., 2008). Les avancées technologiques et leurs applications à l'hydrodynamique sédimentaire en bassin versant seront commentées dans la section E (Projet de recherche).

Pour les concentrations au delà de 100 g.l⁻¹, la distance inter-floes devient très faible, voire nulle. Les agrégats s'enchevêtrent pour former un continuum aux propriétés complexes (effet thixotropique, notamment). C'est le domaine de la rhéologie.

Pour la gamme de concentration intermédiaire ($C=[10-100]$ g l⁻¹), le comportement des sédiments cohésifs nécessite une approche multidisciplinaire alliant la physique des floes, la mécanique des fluides et la rhéologie. Une part importante de mon activité porte sur ces régimes intermédiaires, caractéristiques des milieux turbides et des 'crèmes de vase'. Du fait des difficultés d'instrumentation inhérentes à ces milieux (très forte concentration, mesures très près du fond), nos contributions les plus significatives sur le dépôt des sédiments cohésifs ont été obtenues en laboratoire, notamment en considérant le rôle de la turbulence sur la sédimentation (Gratiot et al., 2005).

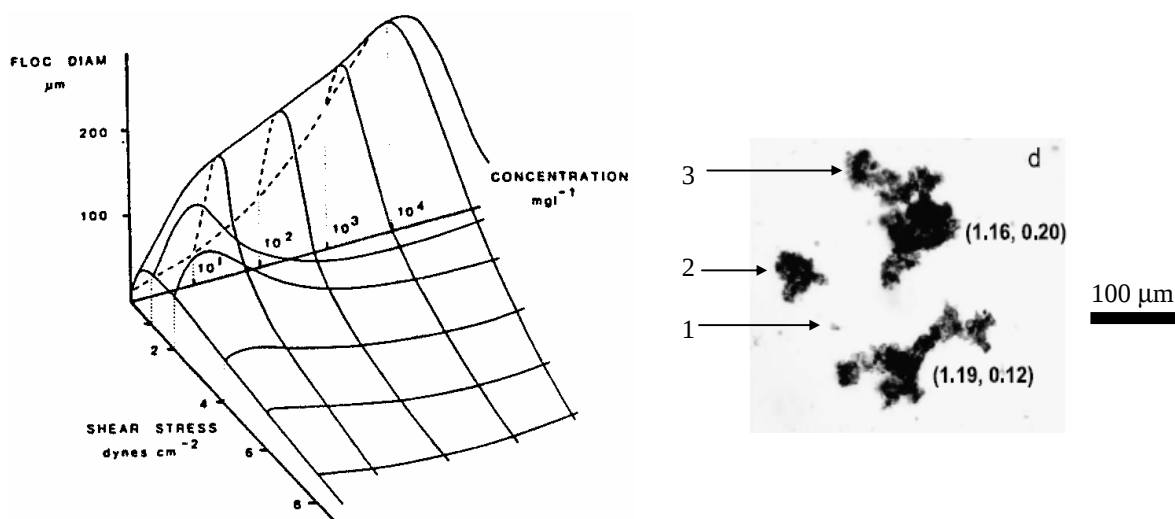


Fig. B.1.4 .A gauche, schéma général d'évolution du diamètre des floes en fonction de la concentration en sédiment et du niveau de turbulence. D'après Dyer, 1989. A droite, photographie de floes en rivière. Sur cet échantillon, on distingue trois ordres d'agrégation : la particule élémentaire d'argile (1), le floc (2) et le macro floc (3). Les techniques vidéo permettent d'attribuer des propriétés 'biométriques' à chaque floe ; par exemple, la dimension fractale et la sphéricité (nombres entre parenthèse). D'après Droppo et al., 2005.

Comme nous le verrons dans la section C, les processus de floculation peuvent être très importants dans la dynamique sédimentaire, notamment en zone de mangrove du fait de la génération de micro-turbulence au sein du système racinaire dans la colonne fluide (Furukawa et al., 1997 ; Gratiot and Anthony, *in prep.*).

2. Modélisation expérimentale du flux de chute des sédiments cohésifs (notamment, Gratiot and Manning, 2004 ; Gratiot et al., 2005 ; Gratiot and Manning, 2008 ; Sottolichio et al., submitted ; Gratiot et Anthony, *en préparation*)

Introduction : chute libre dans un fluide au repos

La formulation analytique la plus simple de la vitesse de chute fut proposée par Stokes en 1851 :

$$w_s = \frac{1}{18\nu} \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_w} g D_f^2$$

Avec w_s la vitesse de chute de la particule, ν la viscosité cinématique de l'eau, ρ_f la masse volumique du floc (ou de la particule), ρ_w la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur, D_f le diamètre du floc ou de la particule.

Cette formulation résulte de l'équilibre entre les forces de traînée d'une part et le poids réduit (de la masse volumique de l'eau) de la particule dans son fluide porteur d'autre part (Figure B.2.1. à gauche). Elle met en exergue l'interdépendance du diamètre de l'objet, sa vitesse de chute et sa masse volumique.

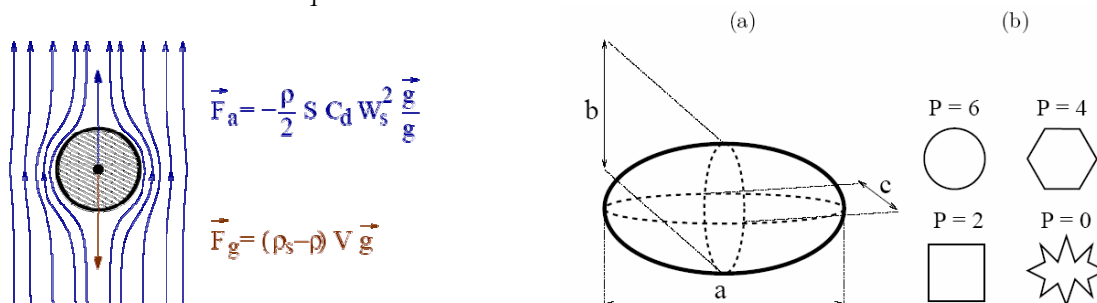


Fig. B.2.1.. A gauche, schéma conceptuel de l'équilibre (dynamique) entre les forces de traînée et de pesanteur sur un corps dans un fluide. A droite, a) sphéricité d'une particule, à gauche, rugosité d'une particule. D'après Camenen (2007)

Du fait des géométries extrêmement variables des particules dans l'écoulement, cette formulation est mise à défaut dans bon nombre d'écosystèmes aquatiques (Fig. B.1.4, Fig. B.2.1. à droite). Pour pallier cette difficulté, de nombreux auteurs ont proposé des formulations semi empiriques prenant notamment en compte les effets de sphéricité, d'angulosité et le périmètre fractal de l'objet (Winterwerp, 2002, Camenen 2007). Ces modifications concernent la chute isolée d'une particule dans un fluide, c'est-à-dire suffisamment loin des autres particules pour ne pas être influencée (distance inter particules supérieure à 3 diamètres). Les lois se complexifient

lorsque les particules interagissent (Camenen and Pham van Bang, in press). C'est le domaine auquel nous nous sommes intéressés.

Pour étudier les processus de chute libre, floculation, chute entravée et tassement dans un fluide au repos nous avons réalisé des essais de sédimentation en colonne avec la vase naturelle de Guyane et de Gironde pour des concentrations moyennes dans la cuve comprises entre 3 g.l⁻¹ et 110 g.l⁻¹. Deux stratégies d'analyses ont été nécessaires :

Au delà, de 20 g.l⁻¹, l'effet d'entravement devient prépondérant et la vitesse de chute décroît. Un front net de sédimentation se forme. L'application de la méthode de Kynch permet alors d'estimer la vitesse d'ensemble de chute dans la colonne fluide (Kynch, 1952).

En dessous de 20g.l⁻¹, le front de sédimentation n'est plus visible à l'oeil nu. Les agrégats présents dans la solution sont alors suffisamment dispersés pour que le front de sédimentation devienne diffus. Pour tous les essais à faible concentration, l'estimation de la vitesse de chute des agrégats qui composent la solution vaseuse a été déduite de l'application de l'équation de conservation de la masse.

$$\frac{\frac{\partial}{\partial t} \int C(z,t) dz}{C(z,t)} = -w_s(z,t)$$

avec C : concentration massique en sédiment, w_s : vitesse de chute des sédiments.

L'application de cette équation pour un essai à une concentration initiale de 8.7 g/l est illustrée sur la figure B.2.2.

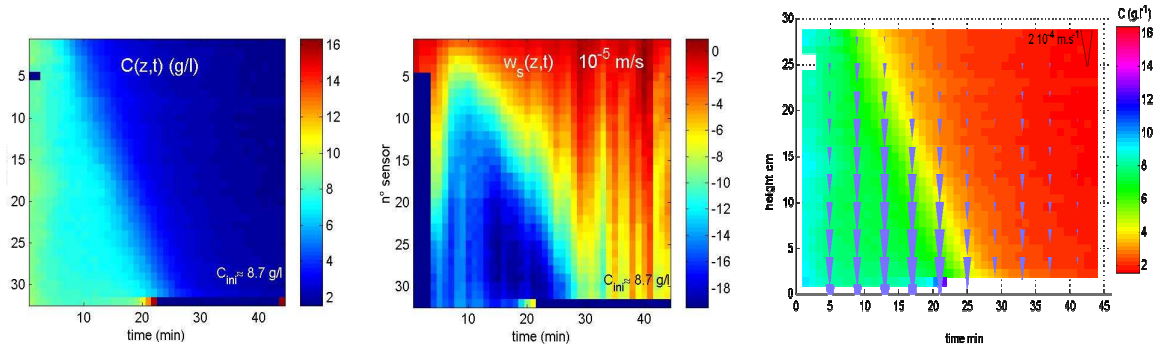


Fig. B.2.2. Essai de décantation en colonne pour une vase naturelle de Guyane à une concentration initiale de 8.7g/l. A gauche, évolution spatio-temporelle de la concentration. Au centre, évolution spatio-temporelle déduite de la vitesse de chute. A droite, superposition des champs de vitesses et de concentration.

Sur le graphe de gauche, le front de chute, bien que diffus, existe encore. Sur le graphe du centre, les processus de floculation sont bien mis en évidence. Ils induisent une très grande variabilité spatio-temporelle des vitesses de chute. Pour une hauteur donnée (un capteur), la vitesse de chute croît jusqu'à 1-2 10⁻⁴ m/s avant de chuter à 10⁻⁵ m/s après le passage du front.

L'expérience a également été réalisée avec de la vase de Gironde. L'ensemble des résultats est synthétisé sur la Fig. B.2.3.

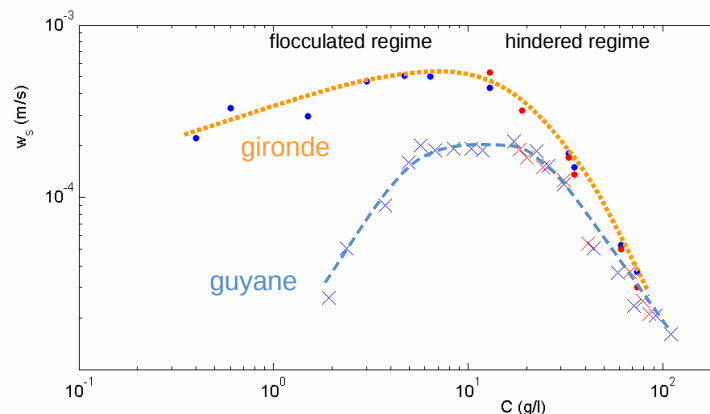
On retrouve des similitudes dans la gamme de concentration privilégiant la floculation et l'entravement. Pour la vase de Gironde et la vase de Guyane, les transitions entre le régime de

floculation, et le régime d'entravement se produisent pour des concentrations équivalentes ($\approx 6\text{g/l}$ et $\approx 10\text{-}15\text{g/l}$, respectivement). La décroissance de la vitesse de chute sous régime d'entravement est sensiblement équivalente. Par contre, l'augmentation de la vitesse de chute sous régime de floculation est très différente. L'effet de floculation est beaucoup plus marqué pour les essais conduits avec la vase de Guyane.

La vitesse de chute maximale qui se produit dans la gamme $[6\text{-}15]\text{ g/l}$ est environ trois fois plus importante pour la vase de Gironde ($\approx 6 \cdot 10^{-4}\text{m/s}$) que pour la vase de Guyane ($\approx 2 \cdot 10^{-4}\text{m/s}$).

Pour les concentrations inférieures à 10g/l , la dépendance de la vitesse de chute à la concentration met en évidence la très forte dynamique des vases guyanaises vis-à-vis de la floculation.

Fig. B.2.3. Effet du type de vase et de la concentration massique en sédiment sur la vitesse de chute dans un fluide au repos. Les mesures en rouge correspondent à la lecture directe du front de chute, les mesures en bleu correspondent à la méthodologie présentée sur la figure B.2.1.



Pour la vase de Guyane, les processus d'érosion et liquéfaction ont aussi été examinés à partir de mesures rhéologiques. Le sédiment présente une composition minérale et granulométrique très homogène sur l'ensemble des sites investigués. Les différences de fonctionnements locaux résultent principalement des variations de concentration.

Une étude préliminaire, menée dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe Aménagement des Risques Naturels du BRGM Orléans (avril 2002), a permis de mettre en évidence une forte discontinuité de comportements rhéologiques, témoin d'un domaine de comportement visco-plastique au delà des concentrations de l'ordre de 600 g.l^{-1} . En outre, des essais d'érosion sous régime de turbulence diffusive ont été conduits au laboratoire des écoulements géophysiques et industriels de Grenoble (LEGI). Ces essais ont révélé une très forte cohésion du lit, même pour des lits fraîchement déposés tels qu'illustré sur la figure B.1.1.d.

Flux de chute dans un fluide turbulent

La modélisation expérimentale de la dynamique des sédiments cohésifs sous régime turbulent peut se faire sous conditions variées, notamment en canal à houle, en canal à courant (avec recirculation, hippodrome, rotatif) ou en expérience de turbulence de grille. Quelle que soit la famille d'expériences considérée, la capacité d'abrasion accrue des sédiments fins détériore les pistons et pompes et constitue un frein à la mise en œuvre d'expérience sous

agitations. Les canaux à houle ou à courant présentent l'avantage de simuler la dynamique sédimentaire sous régime turbulent cisailé, à l'identique des conditions rencontrées en milieux naturels. Dans l'expérience de turbulence de grille, l'agitation verticale d'une grille, sur une amplitude de quelques centimètres et à une fréquence de quelques hertz, génère la turbulence. Ce type d'expérience nécessite peu de vase pour chaque essai (quelques dizaines de litres), conduit rapidement à des régimes permanents pour lequel le fluide et les sédiments sont soumis à une turbulence diffusive aux caractéristiques contrôlées (Fig. B.2.4).

Bien que quelques essais aient été réalisés avec de la vase de Guyane, la plupart des expériences ont été menées avec de la vase naturelle de l'estuaire de Gironde (France) et de l'estuaire de Tamar (Angleterre). Les caractéristiques des vases sont regroupées dans la table B.2.1.

Au total, une trentaine d'essais ont été réalisés et caractérisés macroscopiquement par la concentration massique en sédiment, le type de vase et le niveau de turbulence. La caractérisation du niveau de turbulence a été obtenue suite au développement d'un microprofileur acoustique (Gratiot et al., 2000). L'ensemble des cas est reporté dans Gratiot et al. (2005, Table 1) et les résultats sont présentés sur la figure B.2.5.

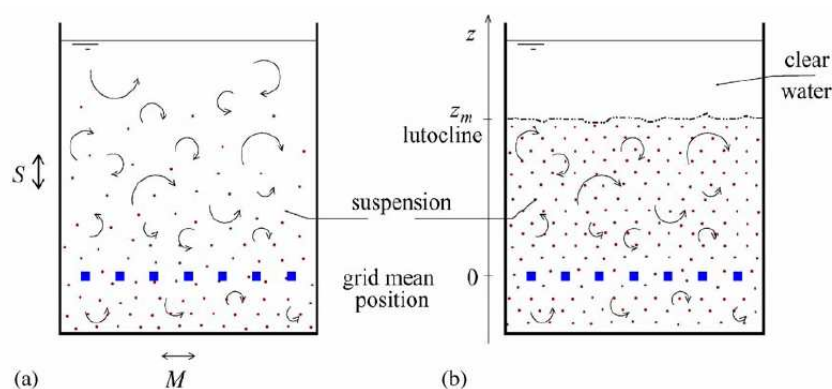


Fig. B.2.4. Expérience de turbulence de grille avec sédiments cohésifs en régime permanent. A gauche, cas d'une suspension diluée (concentration jusqu'à deux trois grammes par litre). A droite, cas d'une suspension chargée (entre 3 et 200 grammes par litre), d'après Michallet et Mory, 2004.

symbol	mud type	estuary	particle size distribution			total organic content % by mass
			D50 $\square \square$ m)	very fine sand ($<125 \square$ m)	silts and clays ($<63 \square$ m)	
T	natural	Tamar	15	7.8	92.2	15.2
Gi	natural	Gironde	13.1	5.3	93.4	11.4
G n.o.	treated	Gironde	12	3	97	0

Table B.2.1. Mineral composition of the mud used (de Crouette et al. (1996) ; Feates et al., 1999 ; Gratiot (2000).

Pour une suspension diluée en régime permanent (essais 7 et 8), la présence des sédiments ne modifie pas notablement la diffusion verticale de l'énergie cinétique turbulente et les profils sont proches de celui de l'eau claire. Pour une suspension chargée (Concentrated Benthic Suspension), la turbulence n'arrive pas à mélanger les sédiments sur toute la colonne d'eau et une stratification de densité (par la concentration en sédiment) apparaît : c'est la lutocline.

Par effet rétroactif, la lutocline limite la diffusion vers le haut de l'énergie turbulente qui est dissipée localement par ondes internes et déferlement. Ce phénomène se produit de manière très efficace pour les essais 3, 4 et 5 à 202, 149 et 51 g/l, respectivement (Gratiot et al., 2005).

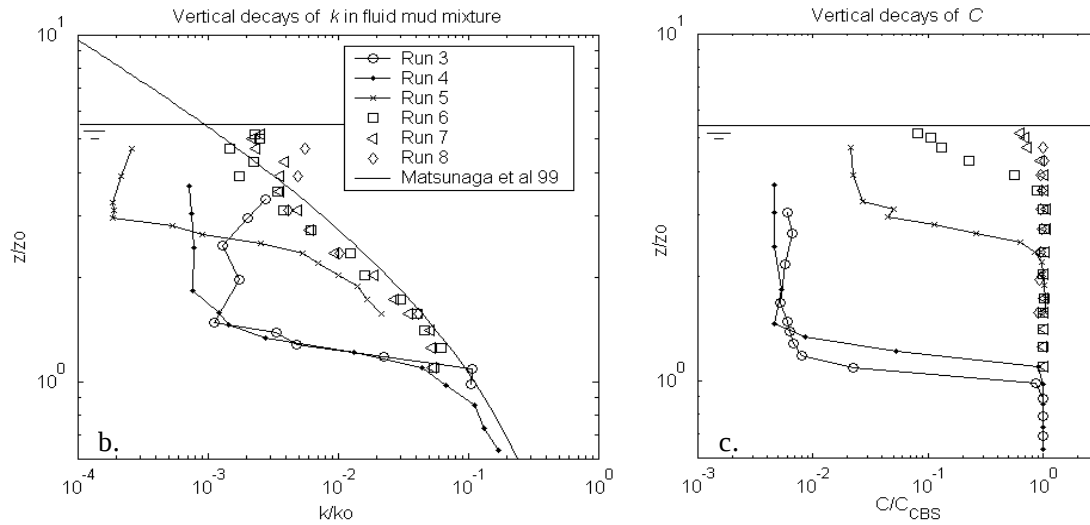


Fig. B.2.5. Régimes permanents en eau claire, suspension diluée et suspension chargée. A gauche, profil adimensionnel de l'énergie cinétique turbulente. A droite, profil adimensionnel de la concentration en sédiments. D'après Gratiot et al., 2005.

Lorsque le régime permanent est établi, le flux de chute des sédiments est rigoureusement compensé par le flux de concentration turbulente et l'on a : $\langle w'c' \rangle = w_s C$.

L'interprétation de l'ensemble des essais a permis d'améliorer la compréhension de la sédimentation des sédiments cohésifs sous régime non turbulents et turbulents. En particulier, nous avons pu montrer que l'évolution du flux de chute des sédiments ($\phi = w_s C$) varie de plusieurs ordres selon la nature des sédiments (cohésifs ou non cohésifs), le régime de l'écoulement (laminaire ou turbulent) et la concentration (Fig. B.2.6). Pour les sédiments cohésifs, le flux de chute est fortement augmenté sous l'effet d'un régime turbulent diffusif (courbe pleine, en grenat et symboles). Le régime d'entravement ne commence qu'au delà de 100 g.l⁻¹. Dans un fluide au repos, la réduction du flux de chute est observée pour des concentrations bien moindres, dès 10 g.l⁻¹ (pointillé orange).

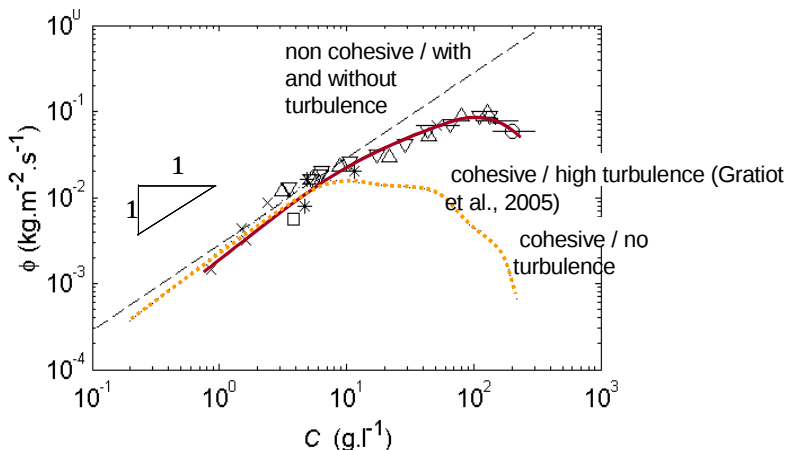


Fig. B.26. Flux de chute des sédiments cohésifs sous régime turbulents et non turbulents dans une gamme de concentration étendue. A gauche, résultat d'un travail expérimental, d'après Gratiot, et al, 2005 ; à droite, campagne de mesure en Gironde pour valider (ou réfuter) les résultats de laboratoire (mission Réagir, Gironde, octobre 2003).

La difficulté majeure rencontrée pendant cette étude consista à dissocier la chute des floccs, par effet gravitaire, du transport convectif par la turbulence ; cela sans extraire les floccs de leur milieu turbulent afin de préserver les interactions floccs-floccs. Cette difficulté a été levée grâce au développement d'un profileur acoustique spécifique (Gratiot et al., 2000) et à la proposition d'un nouveau formalisme analytique (Michallet et Mory, 2004). Le transfert de ce résultat du laboratoire au terrain semble être confirmé par nos dernières investigations (Sottolichio et al., soumis et Fig. B.2.7.).

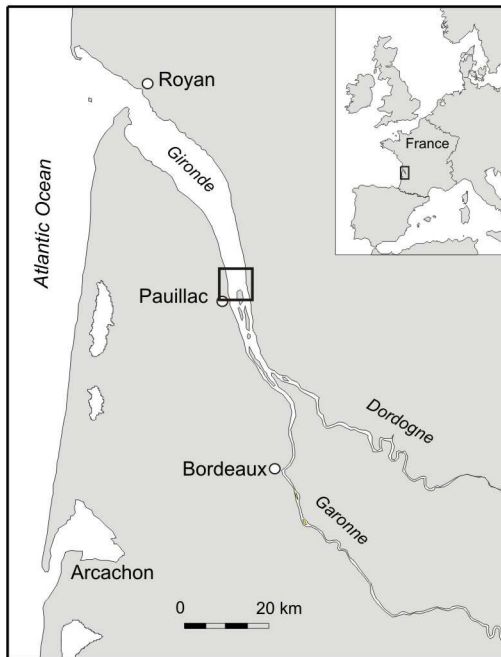
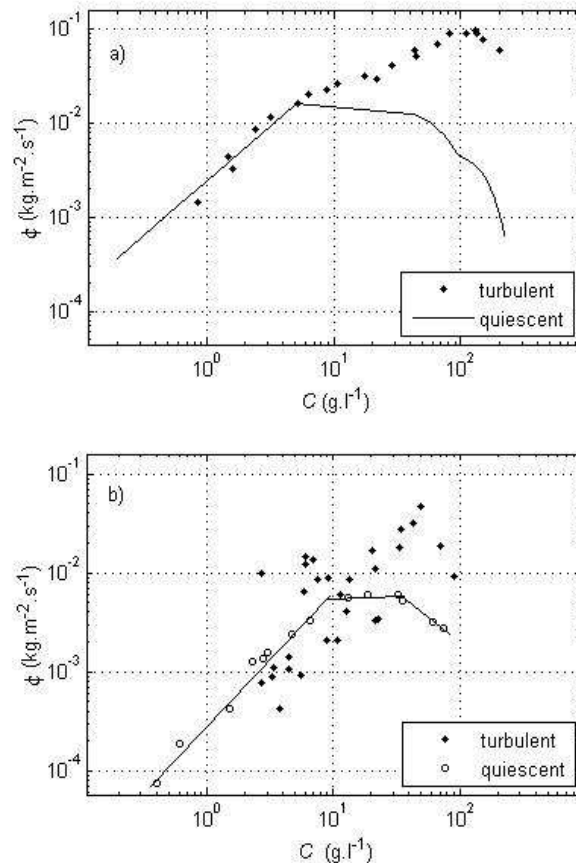


Fig. B.2.7. A gauche. Localisation des mesures de terrain sur l'estuaire de la Gironde. A droite. Intercomparaison des résultats expérimentaux (a) et des mesures en estuaire (b). D'après Sottolichio et al., submitted.



Processus de floculation : caractérisation microscopique

Pour des concentrations dans la gamme (1-5 g l⁻¹), la caractérisation macroscopique des sédiments, par le biais de la concentration a pu être complétée par des mesures discrètes de tailles de floccs et de vitesses individuelles de chute. En pratique, pour chacune des expériences, des floccs ont été prélevés, à différentes hauteurs au dessus de la grille, puis transférés dans une colonne de sédimentation. L'enregistrement vidéo et l'analyse d'images permettent d'obtenir les diamètres et vitesses de chute individuels de tous les floccs.

Les mesures acquises pour la vase de Gironde traitée (sans matière organique) et la vase de Tamar sont présentées sur la figure B.2.8. Dans cette expérience, le niveau de turbulence est caractérisé par le paramètre de dissipation G selon la formulation classique de Camp et Stein (1943 ; voir Gratiot and Manning, 2004). Notons que le développement du micro-vélocimètre (Gratiot et al., 2000) a permis de mesurer à la fois la vitesse turbulente de l'écoulement u^* et

l'échelle intégrale de dissipation d'énergie turbulente ℓ , deux nombres nécessaires au calcul de G .

Sur la figure B.2.8., on note des différences fortes entre la vase de Gironde traitée et la vase de Tamar non traitée. La population de floes de la vase de Gironde présente des diamètres moyens de floes dans la gamme 100-150 μm , significativement plus petits que ceux de la vase de Tamar (250-300 μm). Bien qu'en moyenne, les vitesses de chute des deux types de vases soient comparables, la vase de Gironde traitée présente des valeurs dans un spectre étroit (2-3 mm/s) comparativement à la vase de Tamar (1-5 mm/s). La distribution des propriétés morphométriques (diamètre de floe et vitesse de chute) dans l'espace C-G est assez homogène dans le cas de la vase de Gironde et organisée dans le cas de la vase de Tamar. Ainsi, les floes de plus gros diamètre et de plus grande vitesse de chute sont obtenus pour les concentrations sédimentaires les plus élevées (environ 8 g/l) et les niveaux de turbulence modérée (G de l'ordre de 6-8 s^{-1}).

Ces résultats expérimentaux permettent d'affiner notre compréhension des processus de floculation et défloculation. Nous avons pu montrer expérimentalement que l'augmentation drastique du nombre de collisions ne modifiait pas le caractère constructif (floculation) des collisions et cela, même dans des conditions de turbulence significatives (Gratiot et Manning 2004 ; 2005 ; 2008). Cette capacité est grandement renforcée par la matière organique et a des répercussions majeures sur les flux verticaux de sédiments et des contaminants associés.

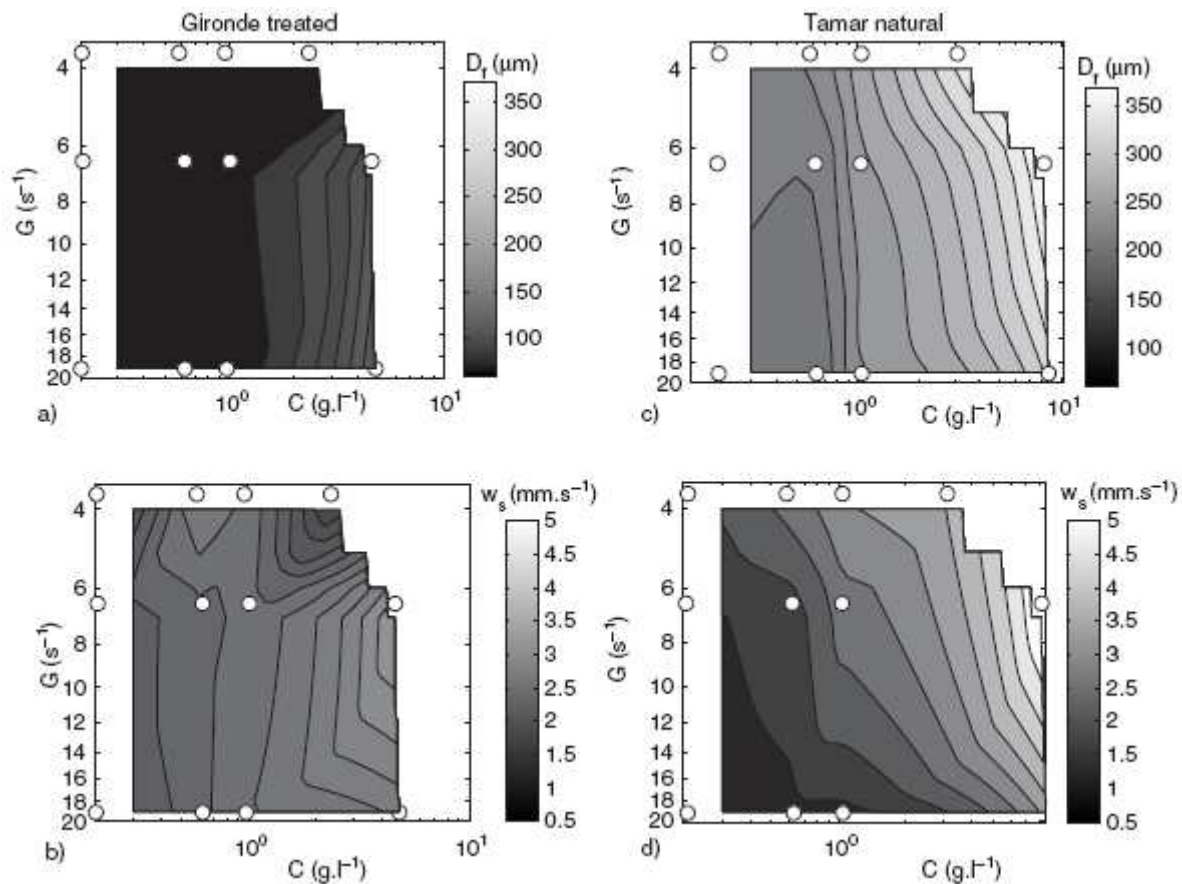


Fig. B.2.7. Evolution des caractéristiques principales des floes (diamètre D_f et vitesse de chute w_s) pour deux types de vases (vase de Gironde traitée, vase de Tamar non traitée), différentes conditions de concentration massique et différents niveaux de dissipation turbulente. D'après Gratiot et Manning (2008).

Pour les trois vases considérées (table B.2.1), une étude plus précise des caractéristiques morphométriques des floccs (vitesse de chute et diamètre) a été réalisée par Gratiot and Manning (2004). Les résultats sont reportés sur la figure B.2.9. La vase de Gironde traitée présente systématiquement une population de floccs unimodale avec un nuage de points distribués autour de $w_s=1.5$ mm/s et $D_f=70$ μm (rond, G.n.o.). Cela correspond à des floccs relativement compacts, dont la densité avoisine $\Delta\rho = 740$ kg.m^{-3} . A l'inverse, la vase de Gironde non traitée (Gi) et la vase de Tamar non traitée (T) présentent systématiquement une population de floccs distribuée selon deux modes centrés sur $w_s=0.8$ mm/s et $D_f=80$ μm et $w_s=1.5$ mm/s et $D_f=200$ μm . Dans cette expérience, les floccs des vases naturelles possèdent une structure moins compacts que les floccs minéraux ($\Delta\rho = 220$ kg.m^{-3}) et les macro floccs ont une structure bien plus lâche dont la densité moyenne n'excède pas 70 kg.m^{-3} .

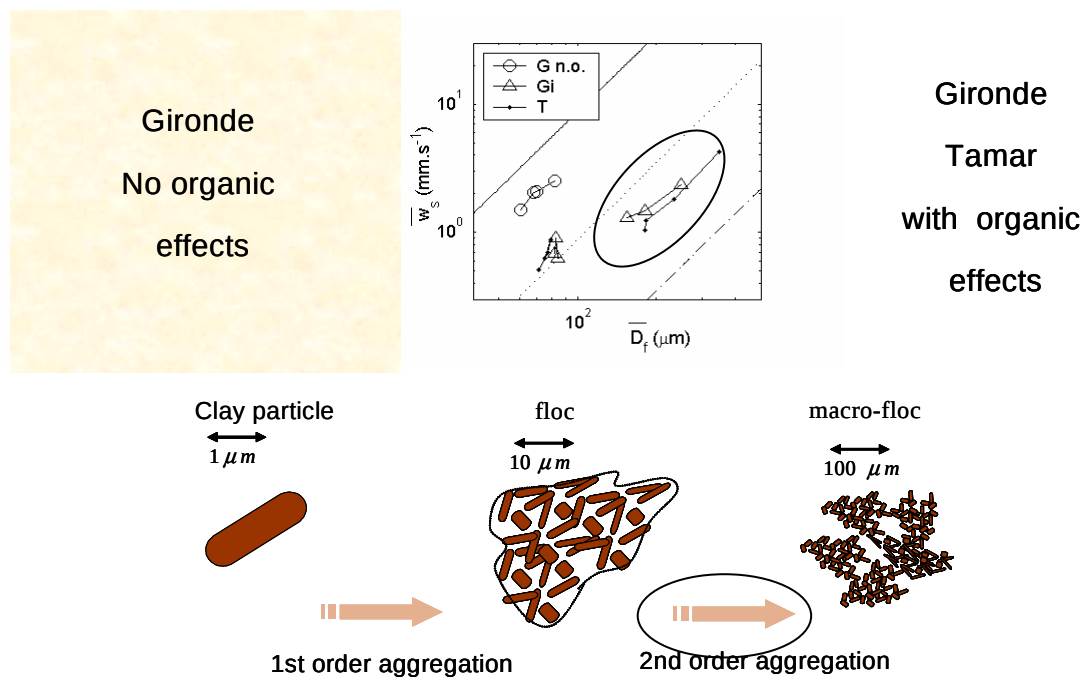


Fig. B.2.9. Influence de la concentration sur les propriétés statistiques de trois vases naturelles sous régimes turbulents. Les vases organiques (Gi, T) présentent une distribution bimodales. D'après Gratiot and Manning, 2004.

Avec ou sans matière organique, l'augmentation de la concentration conduit bien à une augmentation de la floculation mais cette étude a pu montrer que les processus en jeu étaient fortement dépendants de l'activité biologique dans l'écosystème (Fig. B.2.9). En s'appuyant sur le schéma conceptuel de McDowel et O'Connor (1977, Fig. B.1.1.), nous pouvons dire que la floculation minéralogique (G.n.o., vase traitée) contribue principalement à la génération de liens entre les particules d'argiles élémentaires et les floccs tandis que la floculation organique génère des liens puissants et permet la floculation entre floccs pour générer des macro-floccs.

En guise de conclusion, les dix années de recherches menées sur les processus physiques en jeu dans les processus de dépôt des sédiments cohésifs ont permis d'avancer notablement dans la compréhension de la dynamique des écoulements turbides pour des gammes de concentrations à l'interface entre la dynamique sédimentaire classique ($<1\text{g/l}$) et la rhéologie ($>100\text{g/l}$). La mesure de ces milieux a nécessité l'utilisation de techniques vidéo (dès 1999) et le

développement d'un micro-vélocimètre acoustique à effet doppler (Gratiot et al., 2000). La poursuite du développement instrumental par D.Hurther (LEGI) a permis de confronter les résultats expérimentaux aux mesures de terrain (Sottolichio et al., submitted).

Nos recherches ont permis de caractériser la floculation des vases dans les écoulements turbides. Dans le cadre de nos expériences :

- Les processus de floculation et désagrégation sont dynamiques, à la fois dans le temps et dans l'espace.
- Les cinétiques sont largement accentuées par la présence de matière organique, notamment en terme de floculation de deuxième ordre (passage des floes aux macro-floes).
- L'augmentation de la concentration en sédiments favorise systématiquement la floculation. Le processus de désagrégation par collisions ne semble donc pas moteur dans le cas de vases à fine minéralogie. Il est à noter que le comportement pourrait être fort différent dans le cas de mélanges vase-limon-sable (Cuthberston et al., 2010).
- Les niveaux de turbulence intermédiaires ($G=5s^{-1}$) dans un environnement diffusif sont les plus propices à la floculation
- L'impact des floes sur la dynamique du fluide ne se fait véritablement sentir qu'au-delà de 50g/l. Elle résulte autant des effets individuels des floes (nombre de Rouse) que des effets de stratification de l'écoulement par augmentation de densité du fluide chargé en floes (nombre de Richardson de gradient). Nous reparlerons du rôle de ces deux nombres adimensionnels dans le projet de recherche (section E).
- Le flux de chute des sédiments cohésifs en milieu très turbide (10-200g/l) diffère radicalement suivant que le milieu est turbulent ou non. Pour des conditions turbulente et des concentrations massiques voisines de 100g/l, le flux de chute diffère peu de celui des sédiments cohésifs et est plus de dix fois supérieur à celui rencontré dans un fluide au repos.

C. Vulnérabilité de l'écosystème côtier aux modifications géomorphologiques (Plateau des Guyanes)

1. Migration des bancs de vase le long du plateau des Guyanes, approche géomorphologique (notamment Gratiot et al., 2005, Gardel et Gratiot, 2005, 2006, Gratiot et al., 2007, 2008)

Le littoral Guyanais, sous l'influence du flux sédimentaire amazonien, est caractérisé par la formation de bancs de vase en migration depuis les côtes de l'Amapa (Nord-est du Brésil) jusqu'à l'estuaire de l'Orénoque (Venezuela) (Figure C.1.1). A l'échelle régionale et comme l'illustre la figure C.1.2, la côte du plateau des Guyanes présente des zones de bancs et d'inter bancs en alternance (Augustinus, 2004). Les zones de bancs sont facilement détectées grâce à leur extension intertidale qui peut atteindre plusieurs kilomètres de large. Par contre, l'extension subtidale des bancs ne peut pas être déterminée directement à partir d'informations de télédétection si bien qu'une caractérisation précise des bancs nécessite un couplage entre des outils d'observation de la terre et des campagnes de mesures de terrain (Gardel et Gratiot, 2004).

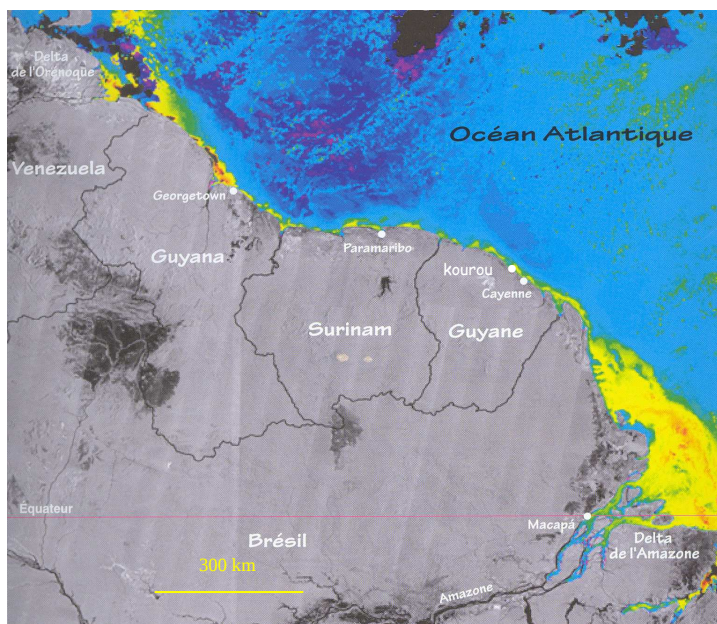
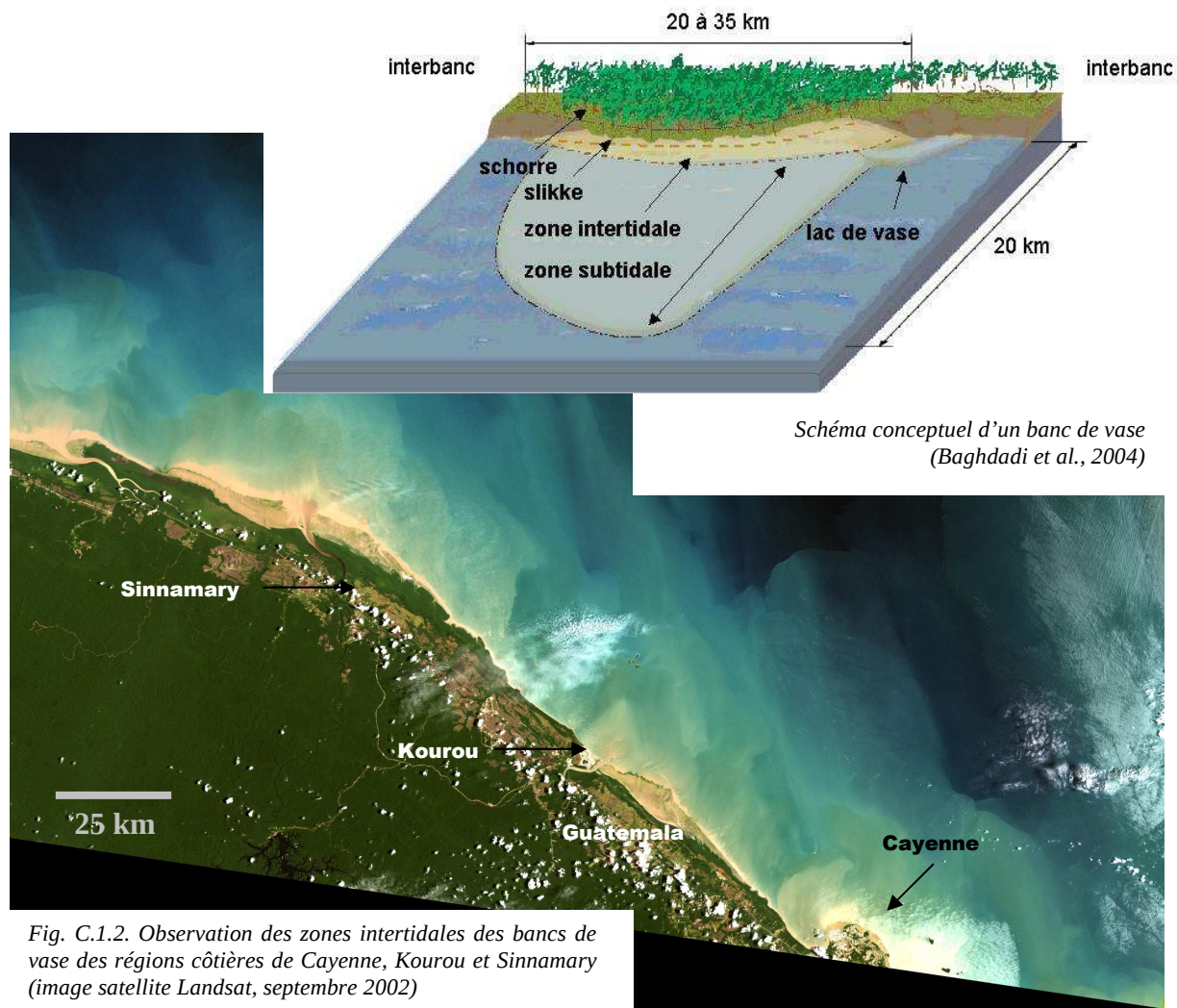


Fig. C.1.1. Indice de turbidité sur la côte du nord-est de l'Amérique du Sud. Océan : 3 images NOAA (Octobre 1999) ; continent : mosaïque d'images J-ERS (1995). Laboratoire Régional de Télédétection - IRD

Compte tenu de l'étendue des zones intertidales, des difficultés d'accès et de la forte dynamique sédimentaire, la détermination de la vitesse de migration des bancs de vase est délicate (Gratiot et al., 2005). Il s'agit pourtant d'une information élémentaire, indispensable à l'étude de la structuration côtière. Dans les précédentes études (Froidefond et al., 1988 ; Eisma et al., 1991), la vitesse de migration était définie comme la moyenne des déplacements de l'avant et de l'arrière du banc. Cette méthode présentait des lacunes importantes, du fait de sa sensibilité au niveau de marée ainsi qu'aux formations éphémères de lacs de vase. L'utilisation des images satellites optiques et radar et les photographies aériennes nous a permis de développer une méthodologie plus robuste (Gardel et Gratiot, 2005, 2006). Cette méthode dite 'matricielle' repose sur une extraction des thèmes d'étude (limite de végétation, limite de vase nue...) sous Système d'Information Géographique (SIG) puis la représentation des informations sous forme matricielle. Cette mise en forme permet l'interpolation des informations manquantes en vue d'un traitement mathématique standardisé.



La méthode a été développée à partir d'une banque de données comprenant 16 images SPOT et 1 image LANDSAT et couvrant tout ou partie d'une frange littorale de 60 km entre 1986 et 2002. Après géoréférencement et intégration sous SIG, deux thèmes principaux ont été extraits pour suivre la cinétique du littoral : la mangrove et la vase intertidale. La méthode se décompose en quatre étapes.

La première étape consiste à projeter les données dans un nouveau référentiel dont l'axe principal est le trait de côte stable (cordon holocène). Un algorithme mathématique est alors appliqué afin de calculer les extensions vers le large de la mangrove et de la vase intertidale dans ce référentiel. Les images n'étant pas acquises à des niveaux de marée similaires, les données issues du thème « vase intertidale » doivent être corrigées ; c'est l'objet de la seconde étape. Cette correction prend en compte la hauteur de marée à laquelle l'image a été acquise et la pente moyenne de la vase intertidale. Elle permet de calculer des découverts de vase correspondant à un niveau de marée équivalent à un mètre. Cette correction permet d'ores et déjà la comparaison date à date des données du thème « vase intertidale ». La troisième étape consiste à projeter les données dans un système de représentation matricielle. Chaque ligne correspond à la projection des informations spatiales des thèmes pour une date donnée (Fig. C.1.3 en haut). La matrice offre ainsi une vision synoptique de l'évolution spatio-temporelle du banc. L'interpolation de la matrice dans une grille uniformément espacée constitue la dernière étape de la méthode (Fig. C.1.3 milieu).

Parmi les applications pratiques, la méthode matricielle permet le suivi de l'évolution de la mangrove et de la vase intertidale et plus généralement toutes les combinaisons mathématiques de ces deux objets d'étude.

Appliquée dans un premier temps à la frange côtière située entre les villes de Cayenne et Kourou, la méthode a permis de mettre en évidence trois périodes (Fig. C.1.3 en bas) : de 1991 à 1996, la vitesse était inférieure à 2.0 km/an. Entre 1996 et 2000 elle a augmenté sensiblement 2.5 à 3.0 km/an, pour décroître de nouveau entre 2000 et 2002 et devenir quasi-nulle en 2003. Ces résultats révèlent des vitesses de migration très variables, et en moyenne beaucoup plus importantes que celles mesurées au début des années quatre-vingt sur la même zone (entre 0.9 et 1.2 km/an, Froidefond et al, 1988). Ainsi, la dynamique sédimentaire côtière et ses fluctuations semblent bien plus actives aujourd'hui que trente ans auparavant. L'analyse de la base climatique ERA40, récemment mise en forme par l' European Center for the Mesoscale, Weather Forecast, précise le rôle prépondérant des houles océaniques dans cette accélération des changements côtiers (Gratiot et al., 2007).

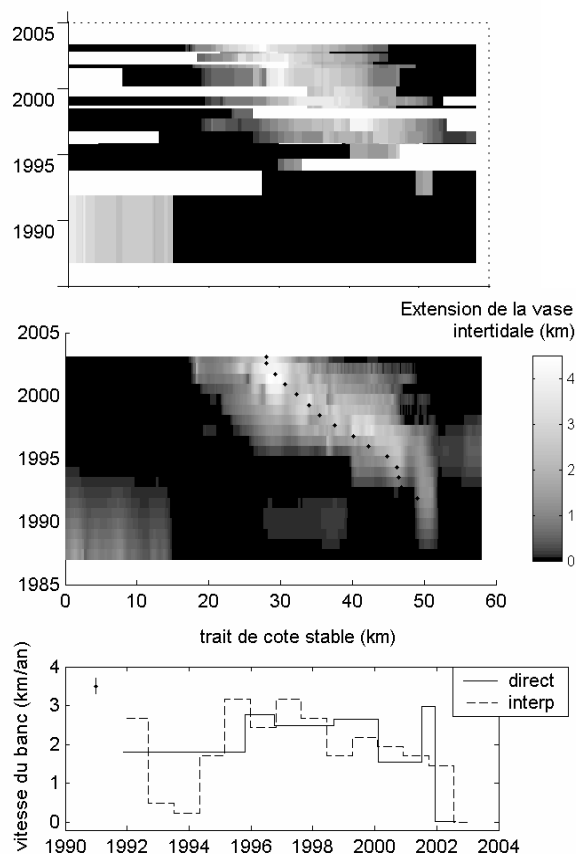
Fig. C.1.3. Etapes de la méthode matricielle, application à la région de Macouria-Kourou.

En haut, matrice non interpolée

Au milieu, matrice interpolée à un pas de temps de 200 j et un pas d'espace de 200 m. L'échelle de gris correspond à l'extension cross-shore de la zone intertidale (en mètre) pour un niveau de marée équivalent d'un mètre. '•' correspond à la position 'barycentrique' de la zone intertidale.

En bas, vitesse de migration du banc déduite de l'évolution des baricentres par mesures directes (—) et interpolées(---).

D'après Gardel et Gratiot, 2005.



L'application de la méthode matricielle a été étendue à l'ensemble des bancs présents en Guyane. Ceci dans le but de définir plus précisément l'effet des particularités locales telles que les baies, les enrochements ou les modifications de l'orientation de la côte. Les matrices obtenues pour chacun des sites du littoral sont assemblées les unes aux autres pour couvrir plus de 200 kilomètres de littoral sans discontinuité (Fig. C.1.4).

Les résultats sur le site de Kaw, à l'est de la Guyane sont difficilement exploitables. D'une part, l'absence de données entre 1991 et 1998, rend les résultats de l'interpolation de la matrice limités. D'autre part, les données satellites sont acquises à des hauteurs de marée assez élevées et

les corrections de marée apportées dans les étapes de la méthode sont insuffisantes. Pour ces raisons, la frange côtière de Kaw n'est pas représentée.

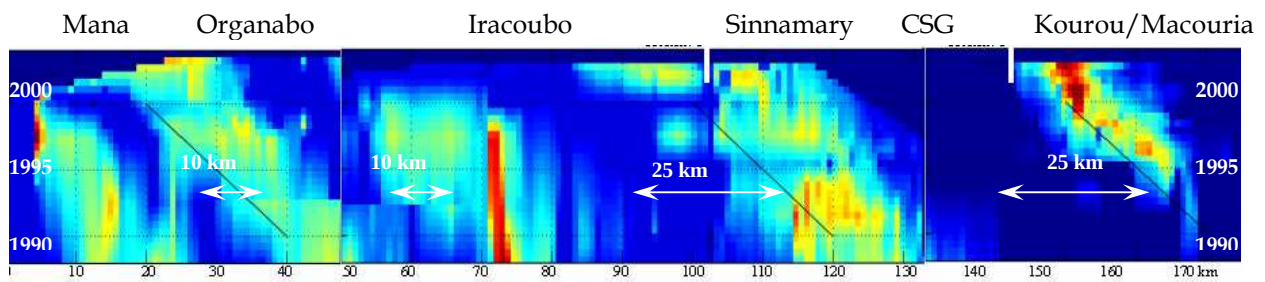


Fig. C1.4.: Assemblage des matrices de vase intertidale de Macouria à Mana. La zone spatio-temporelle couvre près de 200 km de littoral depuis le milieu des années 1980. L'extension de vase intertidale, de 0 à 4 km est représenté par un dégradé de couleur, du bleu foncé au rouge carmin.

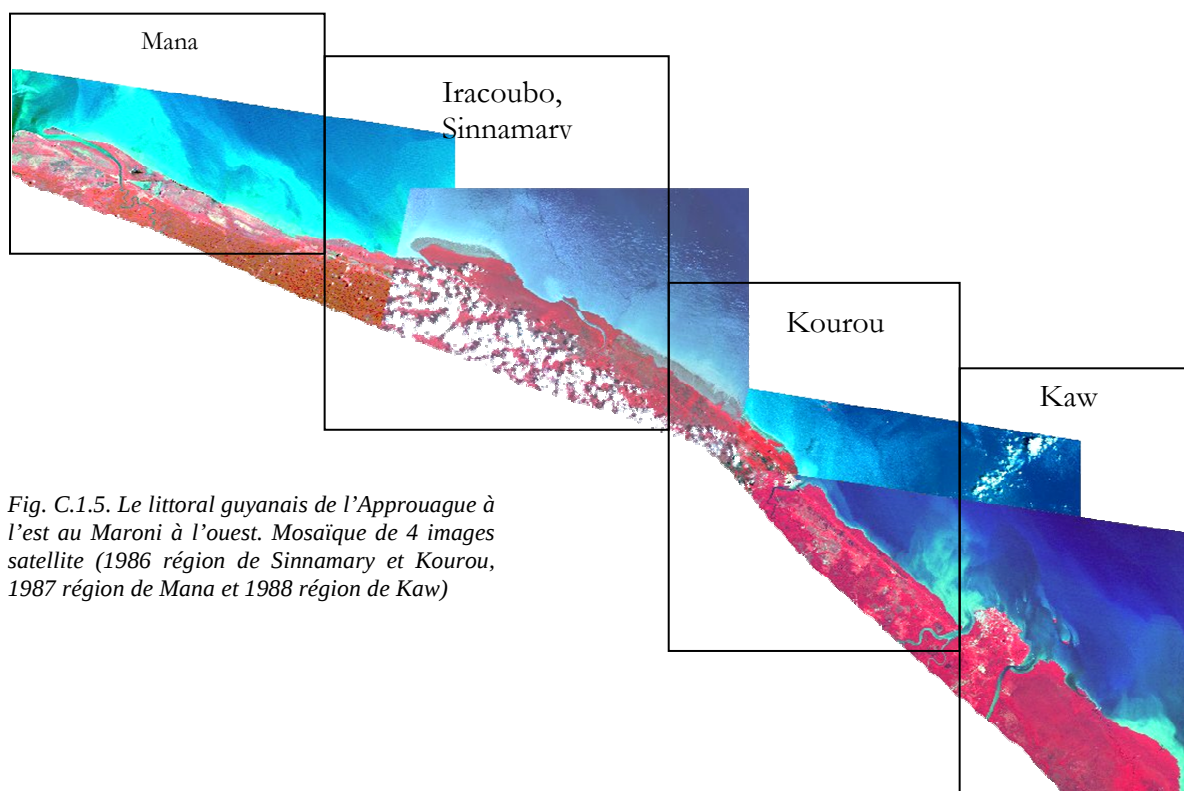


Fig. C.1.5. Le littoral guyanais de l'Approuague à l'est au Maroni à l'ouest. Mosaique de 4 images satellite (1986 région de Sinnamary et Kourou, 1987 région de Mana et 1988 région de Kaw)

La côte guyanaise change d'orientation au niveau de l'estuaire du fleuve Iracoubo (Fig. C.1.5). Jusqu'à Iracoubo, les bancs de Kourou et de Sinnamary sont séparés par des espaces inter-bancs en érosion s'étendant sur 25 à 30 km. Les bancs sont relativement étendus avec des extensions de vase intertidale au large atteignant 4 km (notamment sur le banc de Kourou). La grande barre rouge sur l'estuaire de l'Iracoubo ne doit pas être prise en compte tout comme celle qui se devine au niveau de Mana. Il s'agit d'artefacts liés à la morphologie des estuaires (Fig.C 1.4). Au delà d'Iracoubo, les bancs se resserrent, les distances inter-bancs atteignant en moyenne 10 km. Dans cette partie, les bancs sont beaucoup moins étendus au large, 2.0 à 2.5 km au maximum. L'orientation de la côte est sans doute l'un des principaux facteur de cette dynamique. Effectivement, un angle de côte plus fermé favorisera un étirement des bancs le long de la côte, comme le montrent de récents résultats (Augustinus, 2004).

Afin d'estimer des vitesses globales de déplacement des bancs sur tout ce littoral, des traits noirs sont tracés en diagonal sur les matrices de la Fig.C.1.4. Ces repères représentent une distance de 20 kilomètres sur une durée de 10 ans. Une analyse visuelle de la figure semble confirmer que les vitesses moyennes des bancs sur ces 17 années sont de l'ordre de 2 kilomètres par an. Le banc de Kourou restant celui qui a connu les vitesses de déplacement les plus importantes. A ce stade de l'analyse, le rôle des hauts fonds et battures ne peut pas encore être clairement défini.

La méthode matricielle permet aussi de suivre la colonisation végétale dans des systèmes géographiques fixes ou mobiles. L'application sur l'ensemble du littoral guyanais (système géographique fixe) met bien en évidence les zones alternées de recul et d'avancée de la mangrove (Fig.C.1.6, zones bleues et rouges, respectivement). En moyenne, le littoral présente un recul d' environ 400m depuis 1987. Cette situation inquiétante a pu être mise en évidence du fait de l'aspect intégrateur de la méthode matricielle. L'application dans un système géographique mobile revient à suivre le processus de colonisation végétale, non pas dans le référentiel de la côte mais dans le référentiel du banc de vase en déplacement. Elle révèle des situations paradoxales, pour lesquelles une très forte érosion (jusqu'à 200m/an) se produisait en inter banc, simultanément à des reprises végétales en zone de banc (Gardel et Gratiot, 2006).

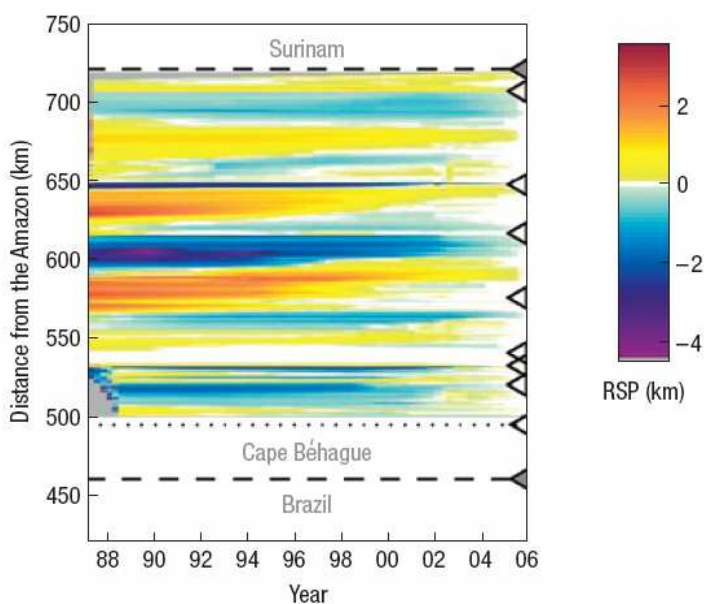


Fig. C.1.6. Evolution spatio-temporelle de la frange côtière de mangrove le long du littoral guyanais. L'année 2006 est pris comme référence. Le recul du trait de côte (Retreat of Shoreline Position) est compté en km, perpendiculairement à la côte.

D'après Gratiot et al., 2008.

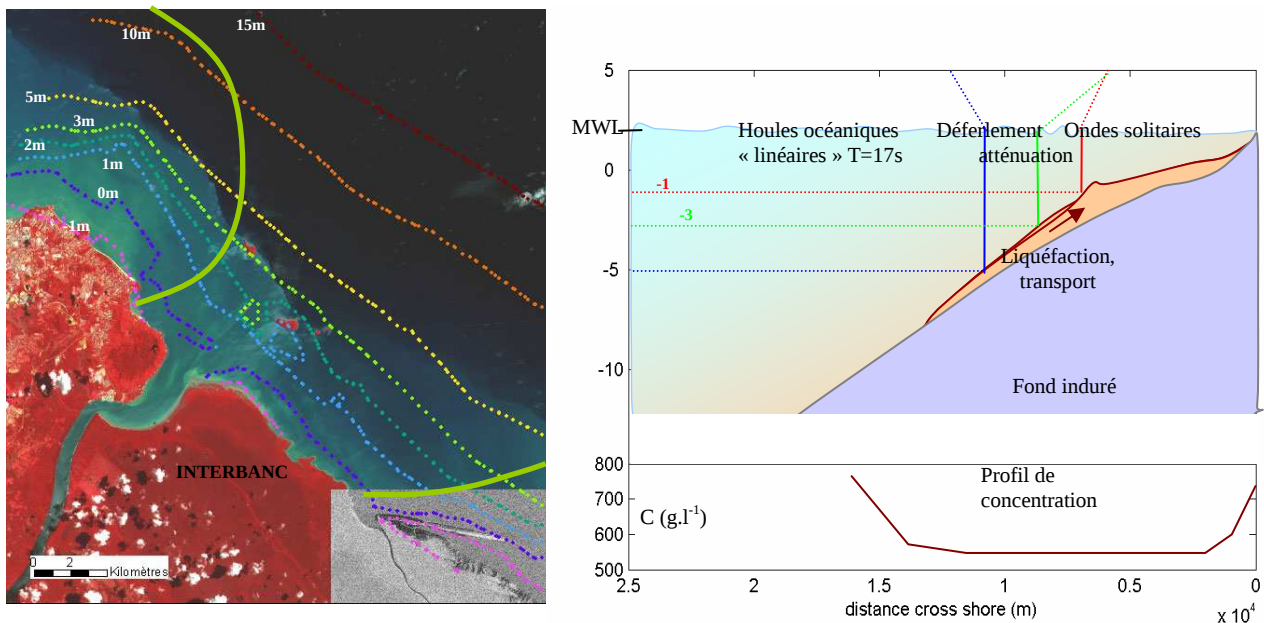
2. Impact des forçages hydrodynamiques sur les bancs de vases en zone proche subtidale (Gratiot et al., 2007 ; Baghdadi et al., 2004)

A partir du schéma conceptuel B.1.2., nous avons tenté de définir l'influence des forçages par le vent (houle et mer de vent) sur la cinétique des zones intertidales. Le banc de vase de Kaw, à l'est de la presqu'île de Cayenne a été utilisé comme site pilote du Programme National d'Environnement Côtier (PNEC).

Une campagne bathymétrique, couplée à des prélèvements par trait de benne a permis de discriminer les entités fonctionnelles constitutives d'un banc de vase (slikke, crème de vase, lit plastique, lac de vase, vase indurée ; Fig. C.1.2 et Baghdadi et al. 2004, 2007). La limite subtidale

du banc correspond à un saut de concentration au delà de la valeur seuil de 650g/l. La concentration des bancs reste relativement homogène ($500 < C < 650$ g/l), à la fois en zone intertidale et en zone proche subtidale (Fig. C.2.1.b). Par ailleurs, l'intégration des données sous SIG n'a pas révélé de corrélation directe entre la bathymétrie de la zone côtière et la limite structurale des bancs (Fig C.2.1.a), confirmant ainsi les résultats de Froidefond et al. (2004) et Gratiot et al. (2005).

L'étude rhéologique menée par T. Aubry dans le cadre d'une collaboration du PNEC a mis en évidence un caractère fortement thixotrope (modification de la consistance en fonction du temps d'application des contraintes) des sédiments du banc ce qui nous a permis d'établir un scénario de structuration des bancs. Selon ce scénario, l'interaction de la houle avec le fond conduirait à la liquéfaction des sédiments, puis son transport et son accumulation en zone proche subtidale avec la formation d'un plateau entre l'isobathe 1 mètre et la côte (Fig. C.2.1.b, '—'). Dans les cas extrêmes, une barre vaseuse peut se former en bordure du plateau. Cette situation constitue très probablement un stade avancé d'accumulation des sédiments du banc par la houle. Cette barre, dont la partie la plus côtière est émergée à marée basse, présente une signature spectrale significative dans certaines images optiques et dans toutes les images RADAR (Baghdadi et al., 2004). Des études réalisées en laboratoire puis sur le terrain ont montré que les barres vaseuses jouent un rôle majeur vis à vis de la colonisation végétale des zones intertidales. Ce point sera développé dans la section C.3.



a)

b)

Fig. C.2.1. a) Bathymétrie de la zone proche côtière depuis Kaw à l'île de Cayenne et limite structurale des bancs durant l'été 2002 (—, Clit=650g.l-1). b) Schéma d'interaction cross shore entre la houle et le banc de vase. D'après Gratiot et al., 2007.

L'analyse du forçage hydrodynamique repose sur des données de vents à l'échelle locale (données météo-France, îles du Salut), le traitement de données de pseudo-stress à l'échelle synoptique (données sur l'Atlantique tropicale, IRD) et les ré analyses ERA-40 pour les champs de houles. L'analyse a révélé l'impact majeur des vents de grande échelle, du fait de la génération

de houles océaniques et de leur interaction avec les zones de banc et d'interbanc. En zone de bancs, les houles les plus longues peuvent paradoxalement avoir un effet positif sur la protection côtière en favorisant la structuration puis la colonisation de la zone intertidale (Gratiot et al., 2007) ; un résultat confirmé par l'approche numérique de Winterwerp et al. (2007) sur les bancs de vase du Guyana.

Malgré ces avancées, il n'est pas envisageable de prédire de façon quantitative la migration des bancs. Les interactions houle/bancs de vases sont complexes et font l'objet d'une modélisation stratifiée de la colonne d'eau qui peut être décrite par l'équation de Rodriguez et Mehta (1998) :

$$C_{bank} = \frac{1}{3} \sin \alpha \left(\frac{\rho_w H_0^3}{\mu_m T_2} \right) \left\{ \frac{h_m^* \rho_m^* (2 - \rho_m^*)}{h_m^* (\rho_m^* - 1)} \frac{\partial \eta_w^*}{\partial s^*} - \frac{h_m^* \rho_m^* (2 - \rho_m^*) + h_w^* (\rho_m^* - 1) + \rho_m^* h_w^* h_m^*}{h_w^* (\rho_m^* - 1)} \times \eta_m^* \frac{\partial \eta_w^*}{\partial s^*} \left[(h_m^* + h_w^*) \rho_m^* - h_w^* \right] \eta_m^* \frac{\partial \eta_w^*}{\partial s^*} \right\}$$

↓ incidence / waves energy input
↓ interaction with the mudbank

Dans cette équation, le premier terme attrait à l'incidence des houles, le second à leur énergie adimensionnalisée par les caractéristiques de viscosité de la vase et le troisième terme décrit les interactions internes houle-vase. L'une des principales difficultés résulte des nombreux termes associés à la rhéologie et de leur évolution temporelle au cours du temps (notamment effets thixotropiques).

Notons que la modélisation numérique de l'interaction houle banc a bénéficié des travaux réalisés au Guyana entre 2004 et 2007 par Delft Hydraulic et Royal Askoning. Un module hydrosédimentaire spécifique a été intégrée au modèle SWAN et a permis de préciser l'amortissement des houles sans toutefois pouvoir apporter de réponses concluantes quant aux évolutions géomorphologiques de la zone intertidale (Winterwerp et al., 2007). Les investigations que nous avons menées sur cette zone géographique seront présentées dans la section C.3. Elles ont révélé des interactions très fortes entre la dynamique sédimentaire et la dynamique de mangrove. Une modélisation réaliste des processus côtiers et des évolutions géomorphologiques se doit de paramétrer des processus biologiques tels que la génération de phytobenthos ou la colonisation de la frange littorale par la mangrove.

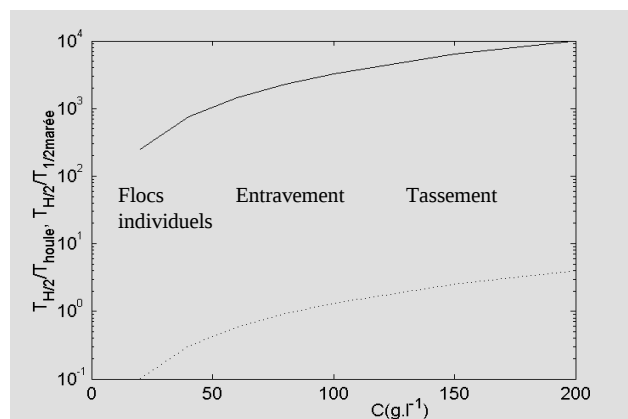
3. Etude du tassement, de la consolidation et colonisation des zones intertidales (notamment Fiot et Gratiot, 2006 ; Anthony et al., 2008 ; Proisy et al., 2009, Gratiot et Anthony, in prep.)

La caractérisation des vitesses de chute et de tassement des crèmes de vase guyanaises a été présentée sur la figure B.2.2. Le temps caractéristique de dépôt des vases fluides $T_{H/2}$ (pour lequel une colonne de vase fluide a chuté de la moitié de sa hauteur initiale) peut être comparé aux temps caractéristique des forçages hydrodynamiques. Pour la gamme de concentration correspondant au régime de chute entravée (20-200g/l), le temps de déposition $T_{H/2}$ est 100 à 10000 fois plus long que le temps de forçage par la houle ($T_{houle} \sim 8-10s$). Le temps de dépôt est également supérieur à la durée du flot ou du jusant ($T_{1/2 \text{ marée}} \approx 6h$) sauf pour les vases fluides en deçà de $70 \sim 80 \text{ g.l}^{-1}$. Dans ces conditions, seules les suspensions diluées ($C < 10g/l$) et à l'abri

des houles ont le temps de se déposer lors des pleines mers. Pour les vases fluides ($C > 20 \text{ g/l}$), on comprend mal comment s'initie le processus de consolidation à la côte. Des essais antécédents (Migniot, 1968) confirment nos estimations. En effet, après un mois de tassement sans aucun forçage hydrodynamique, la concentration de la couche supérieure d'une crème de vase atteint seulement 350 g.l^{-1} et se situe encore dans un domaine de comportement rhéologique bien fluide.

Au cours des périodes de l'année pendant lesquelles l'énergie des houles diminue (avril à novembre), l'exondation des vases fluides à marée basse pourrait bien jouer un rôle décisif en accélérant l'élimination de l'eau interstitielle par évaporation et par drainage. Ce résultat a été confirmé par les travaux de Fiot et Gratiot (2006) et Anthony et al (2008) que nous allons présenter maintenant.

Fig. C.3.1. Comparaison du temps caractéristique de dépôt ($TH/2$) avec le temps de forçage hydrodynamique par la houle (Thoule, '—') et par les marées ($T1/2\text{marée}$ '...') pour différentes concentrations initiales en vase.



Une étude de terrain, multidisciplinaire, a été menée sur la barre vaseuse de Macouria pour suivre sa consolidation et les phases primaires de colonisation par la mangrove (Fig. C.3.2.). L'interprétation du signal de marée (issu des simulations du Service Hydrologique et Océanographique de la Marine) permet de déterminer une relation empirique linéaire entre le temps d'immersion des zones intertidales et la bathymétrie (Fig. C.3.2.a.). La réalisation d'un Modèle Numérique de Terrain, en collaboration avec A.Gardel, E.Anthony et F.Dolique dans le cadre d'une mission PNEC a permis de quantifier la relation entre le temps d'exondation et la formation de fente de dessiccation (Fig. C.3.2.b et C.3.2.c). Ce dernier stade de consolidation des vases joue un rôle très important de piégeage des graines d'avicennia et favorise la colonisation végétale.

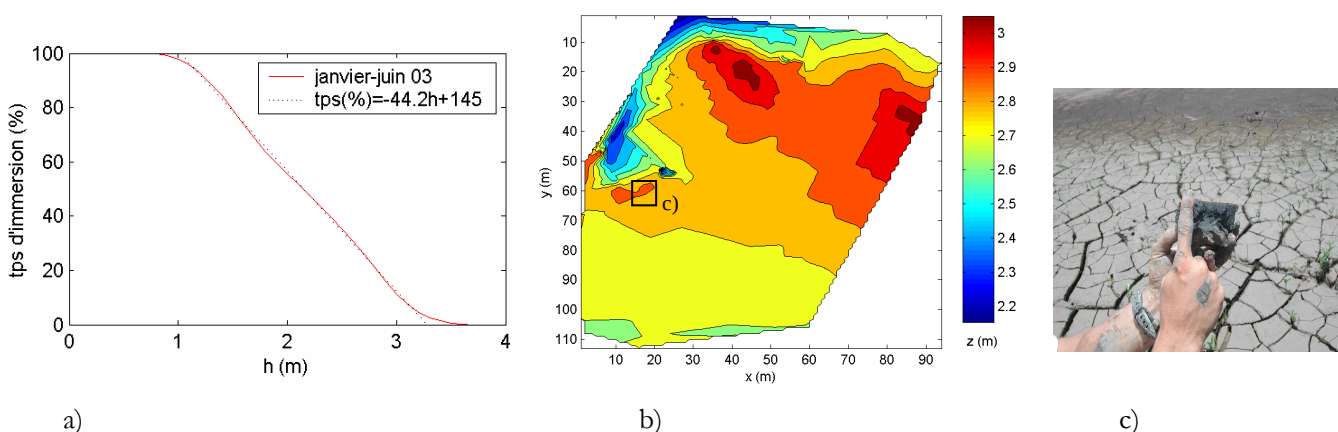


Fig. C.3.2 : a) Relation entre les temps d'immersion et la bathymétrie. b) Modèle numérique de terrain sur les barres vaseuses intertidales de Macouria. c) Fente de dessiccation et début de la colonisation végétale

Des essais de consolidation ont été menés en parallèle au laboratoire pour caractériser les processus de structuration des zones intertidales :

Durant trois mois, des cycles d'immersion-exondation ont été simulés au sein de colonnes correspondant à des altitudes différentes dans la zone intertidale du banc (Fig. C.3.3). Sont également reproduites deux situations « témoins », à savoir celles de vases en immersion et en exondation continues. La réponse de ces colonnes de tassement au cycle tidal, du point de vue de la structuration du sédiment, est observée au travers de l'évolution conjuguée de paramètres tels que la résistance au cisaillement de surface, la concentration superficielle en matière sèche, la salinité de l'eau interstitielle ou encore les caractéristiques simples de tassement. Les mesures de terrain, réalisées selon un protocole d'acquisition identique sur la zone de Macouria, ont été étendues à la majorité des bancs en transit le long de la côte guyanaise.

D'un point de vue sédimentaire, les résultats de laboratoire témoignent d'une importante réactivité de certains paramètres à des phases d'exondations prolongées. Des valeurs de résistance au cisaillement en augmentation de 75% suite à une exondation de quelques jours (3 jours à une semaine) ont notamment été relevées ; de même, des phénomènes de sur-salure se déclenchent de façon quasi systématique lors d'exondations prolongées, avec apparition de fentes de dessiccation. Ces dernières sont des structures éphémères, se refermant partiellement par gonflement des argiles à la marée montante suivante (Yesiller et al., 2000 ; Gratiot an Fiot, 2006).

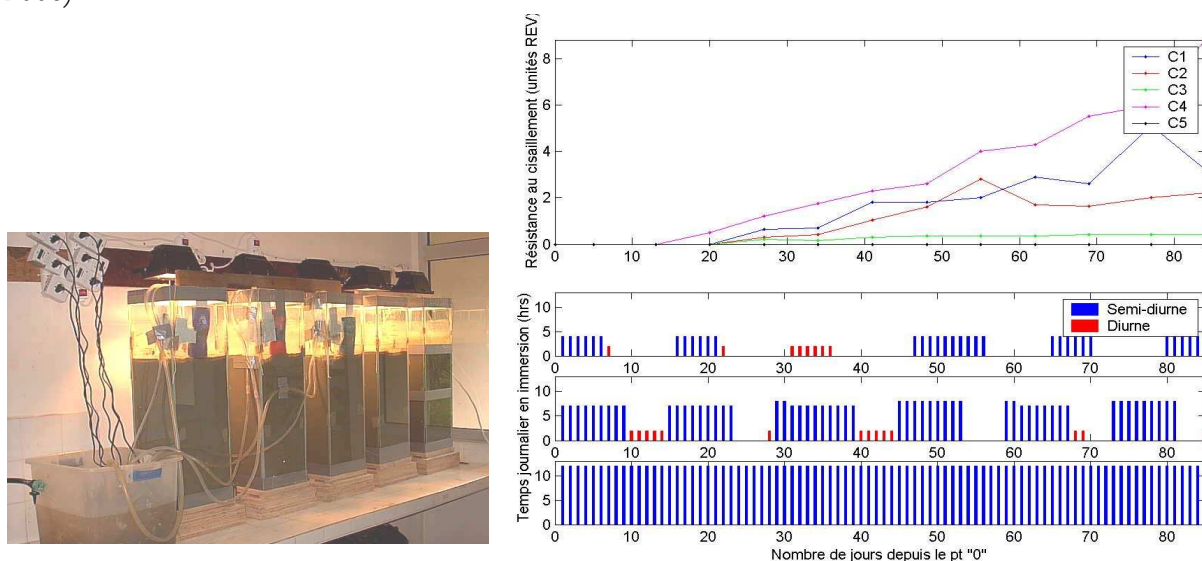


Fig. C.3.3. Essais de consolidation des vases en laboratoire. A gauche, présentation du dispositif expérimental En haut à droite, évolution temporelle du taux de cisaillement de surface des vases en cours de consolidation dans les colonnes C1 à C5. En bas à droite, cycle d'immersion exondation des différentes colonnes. Ces cycles simulent différentes hauteurs de zones intertidales. D'après Fiot et Gratiot, 2006.

D'un point de vue écologique, la formation de fentes de dessiccations sur des sols argileux est un phénomène courant dans les zones climatiques arides et désertiques (Fig. C.3.4.a). Elle est bien plus éphémère et surprenante le long de la côte du plateau des Guyanes (Fig. C.3.4.b). L'apparition des fentes de dessiccation se produit de 10 à 20 fois par an soit 5 à 10% de l'année. Paradoxalement, cette phase d'assèchement critique est un moteur central de la structuration côtière. Nous avons pu montrer que le processus de dessiccation est à l'origine de 95% des cas de colonisation du littoral par la mangrove (Fiot et Gratiot, 2006). Un résultat confirmé par le

croisement d'informations LIDAR et de campagnes de mesures (Proisy et al., 2009 ; Anthony et al., 2008). Il s'agit d'un processus furtif, mais prévisible, du fait du rôle central de la marée. L'ouverture se produit après deux à trois jours d'exondation totale, si les conditions d'évaporation sont favorables, parfois moins d'une journée si il s'agit de ré-ouverture de fentes générées lors de phases d'émersions précédentes (Gardel et al., 2009). La 'cicatrisation' s'opère, du fait du gonflement des argiles, après quelques heures d'immersion.

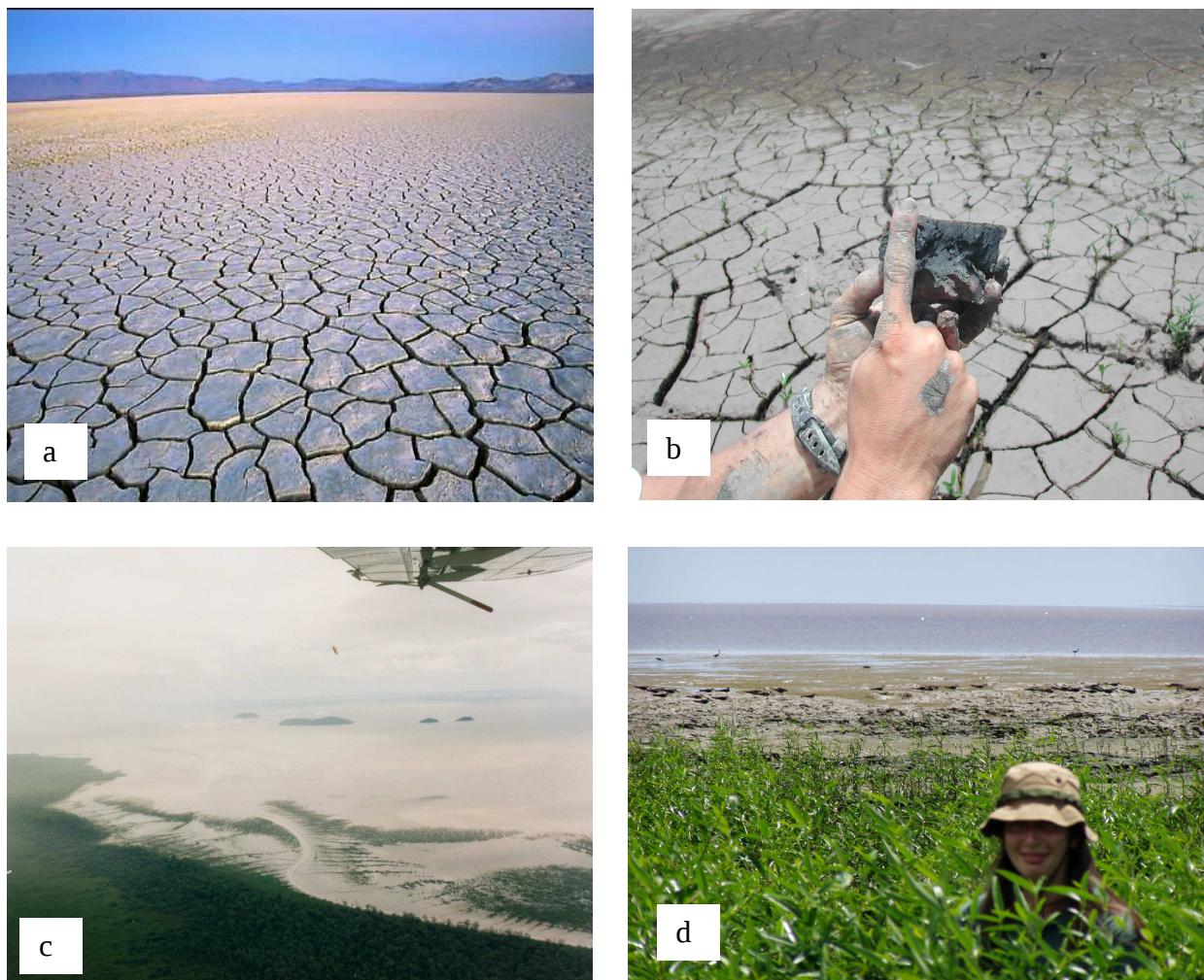


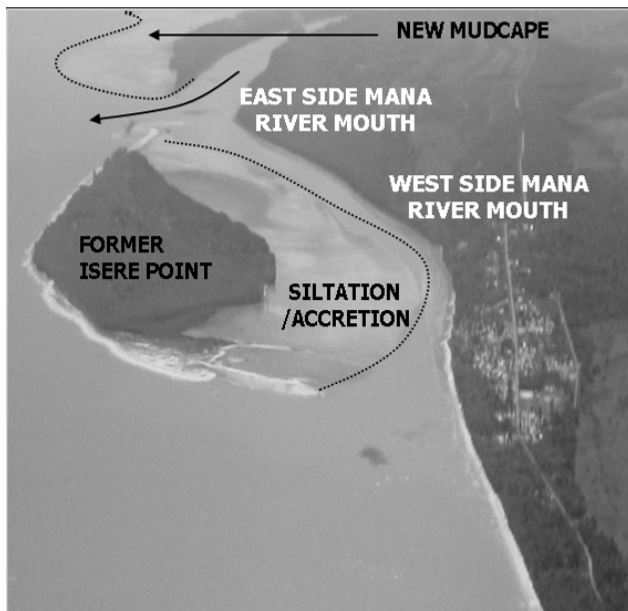
Fig. C.3.4. Colonisation de la frange littorale par la mangrove. a) Figures de dessiccation dans le désert de Black Rock, Nevada, USA, T.Luong, terragalleria.com. b) Piégeage des graines d'*Avicenia Germinans* dans les fentes de dessiccation ; embouchure de la rivière Macouria, Guyane (cliché A.Gardel, mai 2003). c) Colonisation de barres vaseuses à l'embouchure de la rivière de Kaw, Guyane (cliché Lefebvre, 1998). d) Zone de Macouria présentée sur la figure 8b, deux mois plus tard (cliché V.Gond).

4. Impact de la structuration côtière sur l'écosystème

Depuis 2004, une collaboration s'est initiée avec L. Kelle (WWF, Guyane), J. Gratiot et B. de Thoisy (Association Kwata, Guyane) afin de comprendre l'incidence des évolutions géomorphologiques côtières sur l'activité des tortues marines. Les plages de Guyane constituent les plus importants sites actuellement connus sur la façade Ouest de l'Atlantique pour la reproduction de la tortue olivâtre, espèce la plus menacée de cet océan. Outre cette tortue marine, les plages de Guyane offrent aussi des sites de pontes privilégiés pour les autres

tortues de la Guyane : la luth, la verte et l'imbriquée. La reproduction de la tortue luth, espèce en situation imminente de disparition à l'échelle mondiale, se réalise à plus de 50% sur les côtes de la Guyane avec deux sites majeurs ; à savoir les plages de Cayenne et les plages de l'ouest Guyanais (Awala Yalimapo, Mana, Organabo).

Une phase préliminaire a consisté à la mise en œuvre d'un modèle simple de simulation du nombre de pontes à partir d'un échantillonnage parcellaire (Gratiot et al., 2006). Nous nous sommes ensuite intéressés aux impacts géomorphologiques sur l'écosystème. La très forte dynamique côtière peut restreindre les zones de pontes des tortues lors de phases intenses d'érosion ou d'envasement. Un résultat que nous avons mis en évidence en croisant les informations sédimentaires et les informations de comptages de tortues, lors de la période d'envasement de l'île de Cayenne pendant la période 2002-2003 (J.Gratiot et al., 2004). Compte tenu de l'évolution actuelle de la flèche vaseuse de la rivière de Mana, une situation de fort envasement est également à craindre pour les zones privilégiées de pontes de l'ouest Guyanais (figure C.4.1., Kelle et al., 2009).



↑ D'après Kelle et al., 2007..

→ Cliché du Centre d'écologie et
physiologie énergétique, Strasbourg

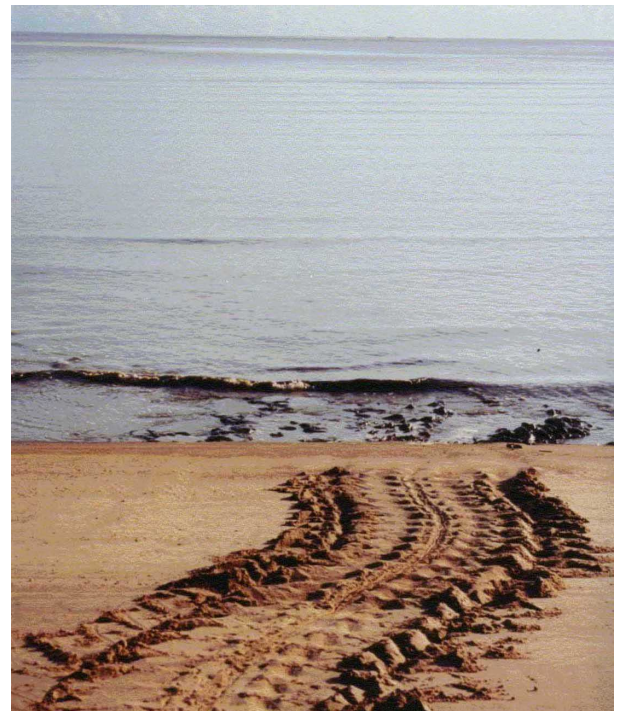


Fig. C.4.1. A gauche, survol de l'ouest guyanais (octobre, 2004) ; la rupture de la flèche vaseuse de la rivière Mana pourrait conduire à l'envasement prochain des plages de pontes d'Awala yalimapo. A droite, trace d'une tortue luth rejoignant l'océan après la ponte. Sur la photo, on distingue des signes évidents d'envasement du bas de plage.

5. Le rôle majeur du cycle de marée à 18.6 ans (Gratiot et al., 2008)

De nombreuses régions côtières sont menacées par l'élévation du niveau des mers sous l'effet de l'expansion thermique (Pikley and Cooper, 2004 ; Zhang et al., 2004). Les côtes les plus vulnérables sont celles pour lesquelles des effets locaux (diminution du flux sédimentaire, subsidence naturelle ou anthropique, renforcement des tempêtes ou des cyclones) se superposent à ces effets globaux (Borrero, 2005 ; Syvitski et al., 2005 ; Dixon et al., 2006 ; Ericson et al., 2006). En étudiant les modifications géomorphologiques de la côte vaseuses des

Guyanes il y a près de 25 ans, Wells et Coleman (1981) émirent l'hypothèse d'un effet significatif du cycle nodal de marée à 18.6 ans sur l'évolution du trait de côte. Ce phénomène astronomique modifie l'amplitude des marées d'environ 3%, ce qui module la position moyenne des pleines mers de quelques centimètres ($\pm 3\text{cm}$ le long des côtes des Guyanes). Le long de côtes extrêmement plates (1km de recul pour 1m de montée), ces quelques centimètres impliquent des changements de plusieurs dizaines (voir centaines) de mètres. L'application de la méthode 'matricielle' (voir section C.1.) sur une base de donnée constituée d'une cinquantaine d'images satellites couvrant la période 1986-2006, montre que les avancées et reculs de la mangrove littoral sont bien gouvernés par le cycle nodal de marée (Gratiot et al., 2008). Les impacts respectifs de l'élévation du niveau de l'océan Atlantique et des cycles Nino/Nina sont également observés mais s'avèrent secondaires (Fig. C.5.1).

D'ici 2015, le cycle nodal de marée va induire une élévation du niveau des pleines mer d'environ 6cm (contre environ 2cm pour l'effet de réchauffement climatique). Cette montée des eaux devrait induire un recul du littoral de près de 150m, 60% de ce retrait étant associé à l'effet de marée. A l'échelle planétaire, de nombreuses côtes vont connaître des élévations du niveau des mers dépassant la dizaine de centimètres (Fig. C.5.2) du fait du cycle nodal de marée. Durant la période 2015-2025, l'effet de marée participera à une diminution du niveau moyen des pleines mers, contrebalançant pour un temps l'effet généralisé d'augmentation par expansion thermique.

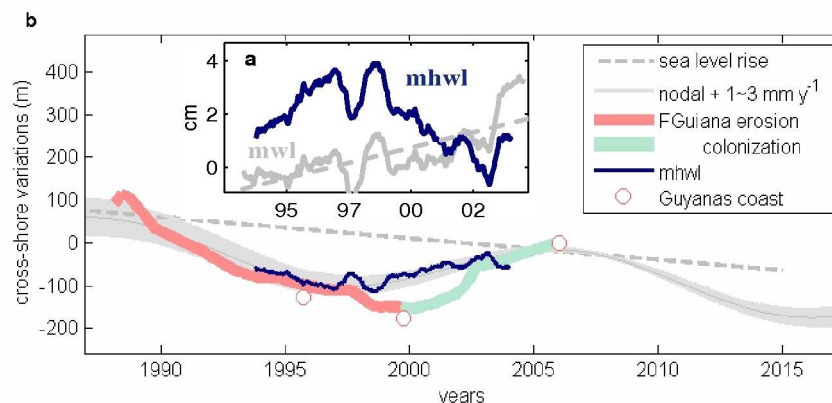


Fig.. C.5.1 a) Fluctuations temporelle du niveau moyen de l'Océan Atlantique (mwl) et du niveau moyen des pleines mers (mhw), au droit des Guyanes (issu des produits Ssalto/Duacs©). b) Evolutions mesurées (courbes roses et vertes) du littoral de Guyane Française et comparaison au modèle de prédiction (courbe grise), l'année 2006 étant référencée comme année origine. Les points blancs indiquent la tendance issue de mosaïques satellites sur les 1500 km du plateau des Guyanes. D'après Gratiot et al., 2008.

Mean sea level rise from now to 2015

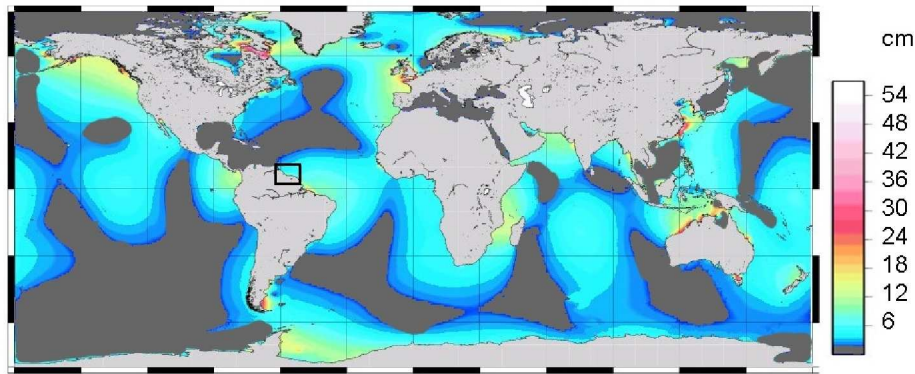


Figure C.5.2. Elévation du niveau moyen des pleines mers sous l'action du cycle nodal de marée à 18.6 ans d'ici 2015. Les zones grisées correspondent à des zones d'élévation limitées (ou de diminution). La zone encadrée (48W-62W-2N-12N) délimite le système sédimentaire du plateau des Guyanes. D'après Gratiot et al., 2008, adapté de Simon, 2007.

6. Comparaison avec l'écosystème côtier du Guyana : clarification des contributions physiques, biologiques et humaines (Gratiot et al., 2008 Supplementary Information ; Gratiot et Anthony, en préparation)

La côte du Guyana fait partie des 1600km de côtes vaseuses du plateau des Guyanes, dominée par la migration d'une vingtaine de bancs de vase (chacun ayant un volume d'environ $800 \cdot 10^6$ tonnes) depuis l'embouchure de l'Amazone (Brésil) jusqu'à l'Orénoque (Vénézuëla).

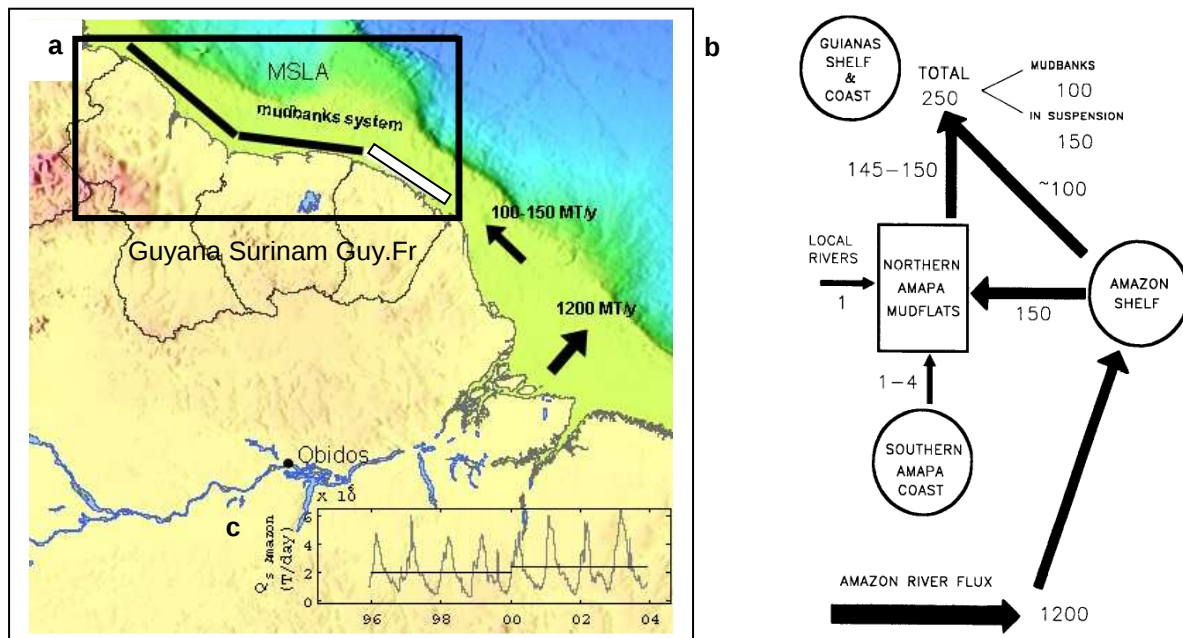


Fig. C.6.1. Bilan sédimentaire du plateau des Guyanes. A) Géographique du plateau. B) Schéma conceptuel des flux sédimentaires. D'après Allison et al., 1995. c) Débit solide de l'Amazone à Obidos de 1996 à 2003. D'après Guyot et al., 2005.

Actif depuis plusieurs millénaires (Allison et al., 1995), il s'agit d'un système vase-mangrove unique, le plus long du monde (Froidefond et al., 1988 ; Eisma et al., 1991 ; Allison et al., 2000 ; Gratiot et al., 2008). Ce système structure la côte d'un point de vue sédimentaire mais joue également un rôle très actif pour la production et l'exportation de la biodiversité, potentiellement à l'échelle globale (Aller et al., 2010).

L'évolution des flux sédimentaires est schématisée par Allison et al. (1995), figure C.6.1b. Sur l'ensemble du flux Amazonien, un total de $250 \cdot 10^6$ T/an cheminent au niveau du plateau continental des Guyanes ; $100 \cdot 10^6$ T/an sous forme de banc de vase et $150 \cdot 10^6$ T/an sous forme de suspension turbide transitant généralement le long de la côte en eau peu profonde 0-20m. L'évolution temporelle indique un accroissement des flux sédimentaire de l'Amazone, de l'ordre 20% entre 1995 et 2007 (Guyot et al., 2005, Martinez et al., 2009).

Les travaux réalisés depuis plusieurs décades ont bien établi le rôle des bancs de vases sur la dynamique sédimentaire tandis que jusqu'à présent, la suspension turbide était considérée comme un élément secondaire de la structuration du littorale. L'intercomparaison de la dynamique côtière au Guyana et en Guyane Française apporte de nouveaux éléments d'analyse. J'ai réalisé cette étude en mai-juin 2010, dans le cadre d'un travail d'expertise commandité par l'European Development Funds pour le bénéfice de la cellule « Infrastructure de lutte contre l'érosion côtière » du gouvernement du Guyana.

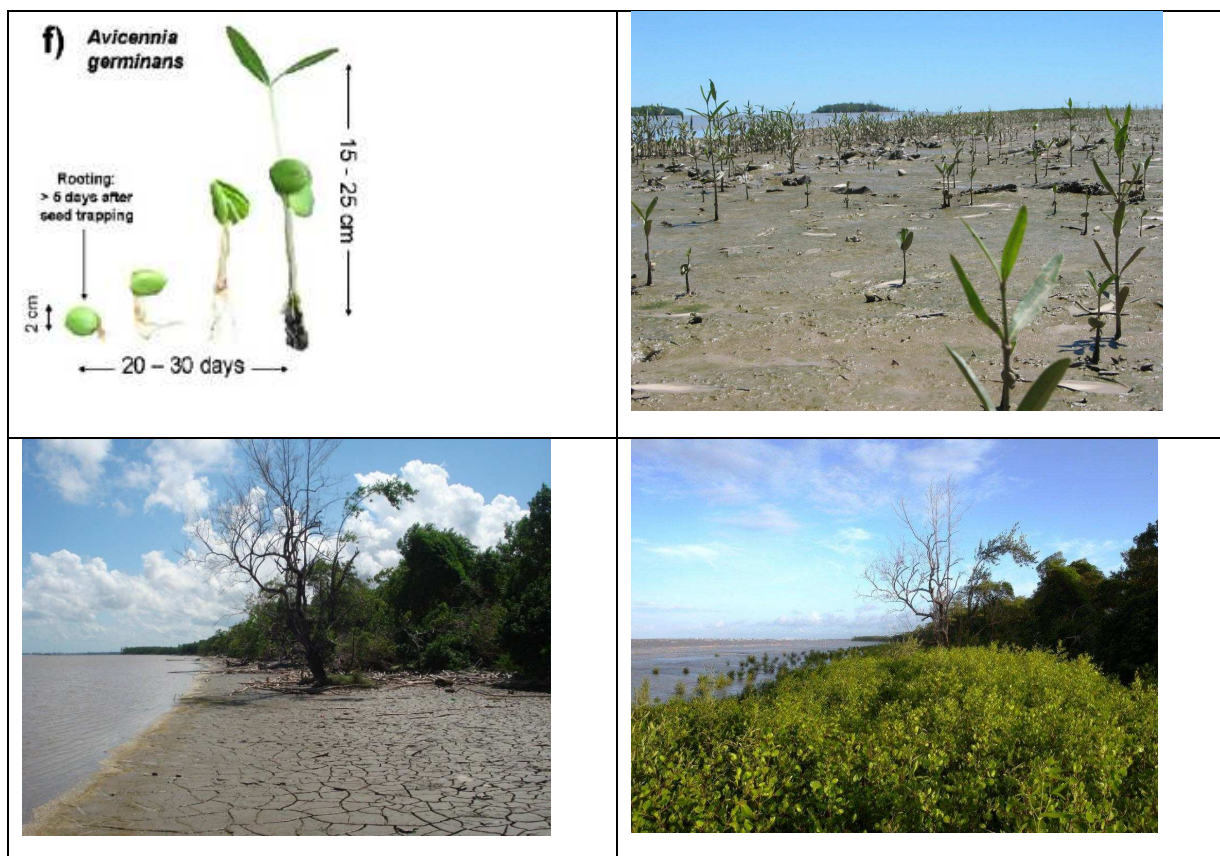


Fig. C.6.2. Colonisation de la frange côtière par *Avicennia Germinans*. En haut à gauche, physiologie des graines d'*avicennia*. D'après Proisy et al., 2009. En haut à droite colonisation par diffusion des graines depuis la mangrove mature jusqu'aux zones de vases molles. En bas, colonisation d'une frange côtière du Guyana par piégeage des graines dans des fentes de dessiccation . Les deux photos sont prises à quelques mois d'intervalle. D'après Allison et al., 1995. c) Débit solide de l'Amazone à Obidos de 1996 à 2003. D'après Guyot et al., 2005.

Dans de précédents travaux (voir section C.3.) nous avons montré que la mangrove participait activement à la structuration de la zone de vase intertidale. L'espèce *Avicennia Germinans* est quasi monospécifique sur la frange côtière (avec *Laguncularia* comme espèce secondaire en zone littorale et *Rhizophora* le long des cours d'eaux). Elle a su développer des stratégies de colonisation très actives, basées sur trois modes (Proisy et al., 2009) :

- Colonisation par diffusion depuis le front de mangrove mature (Fig. C.6.2 en haut à droite).
- Colonisation le long des chenaux de drainage.
- Colonisation sur les barres vaseuses lors des dessiccations (Fig. C.6.2 en bas).

Ces trois stratégies de colonisation nécessitent, d'une part, une bonne connexion des zones colonisables aux graines disséminées par la mangrove mature et d'autre part, un substrat vaseux, permettant la fixation des graines et leurs germinations en quelques jours.

Comme le montre le schéma législatif du littoral au Guyana (Figure C.6.3), les choix d'aménagement de la frange côtière du Guyana ont conduit à une disjonction entre la mangrove jeune et la mangrove mature. Ainsi, une digue côtière longe le littoral et protège des habitations, des zones d'agriculture et d'aquacultures implantées postérieurement. Les zones agricoles et aquacoles présentent également des chenaux d'irrigation qui limitent plus encore la connexion terre-côte.



Fig. C.6.3. Schéma législatif d'aménagement côtier au Guyana. La frange de mangrove est coupée par des digues assurant la protection d'habitations, d'aquaculture et d'agriculture.

Ce choix a d'ores et déjà conduit à un déséquilibre du système mangrove-vase dont on peut craindre qu'il s'accroisse.

Sur la base d'analyses géomorphologiques, Anthony et al. (2008) et Gratiot et al. (2008, Figure C.1.6) ont pu montrer qu'un système mangrove-vase à l'équilibre présente des avancées et reculs du trait de côte de l'ordre du kilomètre, naturellement. Dans un contexte analogue le long de zone d'aquaculture en Thaïlande, Winterwerp et al. (2007) ont développé un modèle théorique qui préconise également une frange de mangrove de plusieurs centaines de mètres pour un écosystème côtier à l'équilibre. Ces recommandations issues d'observations géomorphologiques trouvent trois explications physiques, à plus petite échelle :

- La mangrove, qu'elle soit sur pied ou érodée, présente un enchevêtrement de racines et de troncs qui dissipe l'énergie incidente des houles et des courants et réduit considérablement les capacités érosives de la houle (Figure C.6.4. à gauche). Ainsi, Barbier et al. (2008, Supplementary Information) ont pu montrer qu'une houle incidente ayant des hauteurs significatives de vagues de un mètre se réduit à 10cm après une propagation d'un kilomètre dans la mangrove.
- Cette dissipation de la houle transforme l'énergie incidente en turbulence diffusive et contribue activement à la floculation et la sédimentation des particules (Figure C.6.4. à droite, Furukawa, 1997). Les processus en jeu sont très similaires à ceux simulés dans l'expérience de turbulence de grille (voir section B.2.).
- En renforçant la sédimentation, la mangrove facilite également l'accroche des graines de mangroves dans un substrat meuble (Figure C.6.2 en haut à droite).

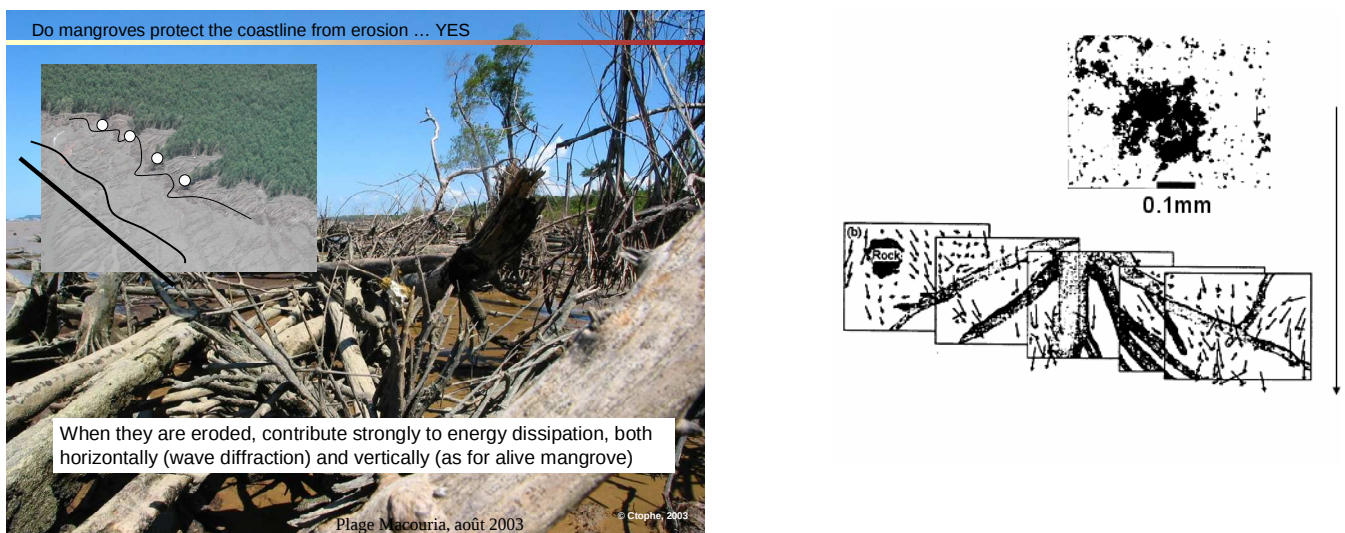


Fig. C.6.4. Impact de la frange de mangrove sur la sédimentation. A gauche, d'un point de vue géomorphologique, la mangrove (vivante ou morte) contribue activement à la dissipation de l'énergie incidente. A droite, la génération d'une turbulence diffusive favorise la floculation. D'après, Furukawa et al., 1997.

Les trois processus précités génèrent un cercle vertueux qui, une fois rompu, peut avoir des conséquences catastrophiques. Sur la photographie présentée sur la figure C.6.5., les graines d'avicennia n'ont que très peu de chance de s'ancrer dans un substrat sablo-limoneux, suffisamment dur pour marcher dessus. L'arrivée prochaine d'un banc de vase ne pourra pas être naturellement colonisée par la mangrove du fait du manque de graines. L'énergie incidente des houles sera intégralement dissipée par le banc de vase ce qui réduit grandement les possibilités de consolidation (Figure C.3.1).

L'intercomparaison du système vase-mangrove existant en Guyane Française et celui observé au Guyana ont révélé le rôle majeur de la frange de mangrove côtière dans la stabilisation du système en place depuis plusieurs millénaires. La frange de mangrove n'est pas uniquement un marqueur du déplacement des bancs de vase mais elle contribue activement à la dissipation de l'énergie des houles, la floculation des particules et l'ancrage des nouvelles graines. Cela peut

être concomitant à des phases d'érosion végétale de plus d'un kilomètre si bien qu'un système à l'équilibre doit présenter une frange de mangrove de cet ordre.



Fig. C.6.5. Zone sablo-limoneuse d'inter-banc au Guyana. Le substrat est suffisamment dure pour pratiquer le cricket, sport national.

Les observations de terrain réalisées dans plusieurs régions de la côte du Guyana ont révélé la fragilité de l'espace côtier d'ores et déjà fortement en déséquilibre. La restauration d'un système naturel sera difficile mais paraît plus viable qu'opter pour l'endiguement généralisé de la côte. Les fleuves locaux n'ont pas un apport sédimentaire très important et celui-ci risque de diminuer suite à l'installation de barrage pour l'hydroélectricité et la prévention du risque de crue. Ainsi, opter pour un aménagement côtier qui se prive du potentiel piégeage des sédiments amazoniens paraît particulièrement risqué.

D. Dégradation des écosystèmes continentaux : érosion des sols, flux de sédiments et nutriments associés (Mexique)

1. Préambule

L'érosion des sols continentaux, et plus généralement leur dégradation à l'échelle planétaire sera l'un des enjeux environnementaux majeur du XXI^{ème} siècle. Les temps géologiques que nécessite la formation des sols en font une ressource finie, son altération doit être pensée comme une décision de Société irréversible. Dès lors, une question fondamentale s'impose :

Les terres cultivables seront-elles suffisantes, en quantité et qualité pour nourrir les 9 milliards d'habitants qui peupleront la planète d'ici 2050 ?

Le boom démographique, la diminution des terres cultivables (notamment par conversion pour la génération d'agro-carburant), l'impact du changement climatique sur la qualité intrinsèque des sols (notamment la matière organique), la pression sur la ressource en eau (qualité et quantité) et les changements des régimes alimentaires figurent parmi les facteurs de pression forte sur les sols et leur productivité alimentaire (Servat et al., 2010).

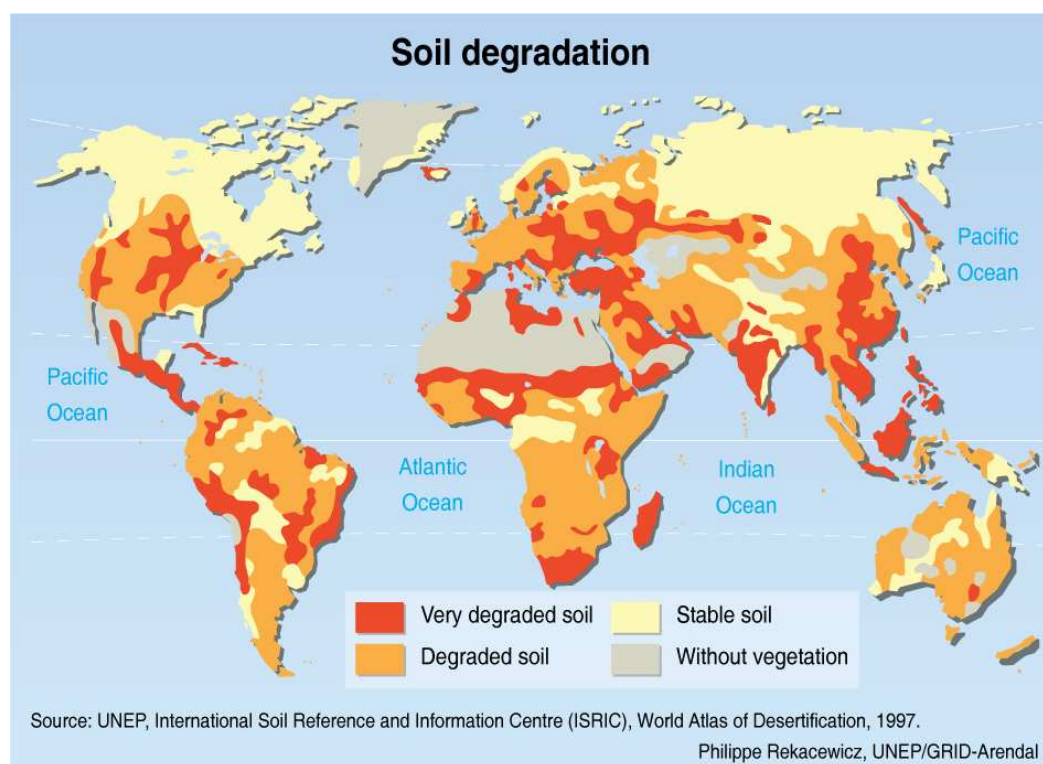


Fig. D.1.1. Atlas mondial de dégradation des sols à l'échelle planétaire. UNEP (1997).

Comme l'illustre la figure D.1.1, la dégradation des sols est un phénomène mondial qui n'épargne aucun continent. Une fois engagé, le processus de dégradation des sols est généralement amplifié naturellement dans les zones semi-arides (Quinton et al., 2010). Environ 28% de la dégradation mondiale est attribuée à l'érosion éolienne (5.5 Mkm²) et 56% à l'érosion hydrique (11Mkm²). Cette dernière constitue la principale menace pour les sols en Europe. Elle a d'ores et déjà dégradé 260 000 km² (PESERA, 2004). Sur le continent Américain (Sud et Nord), le Mexique figure en tête des pays souffrant de dégradation des sols. Celle-ci concerne 24% du pays et 34% de la population (Gnacadjia, 2008).

2. Evolution pluriannuelle des régimes hydrologiques et sédimentaires sur les hauts plateaux volcaniques du Mexique : bassin versant de Cointzio, Michoacán (Gratiot et al., 2010 ; Lopez-Granados et al., en préparation).

L'état du Michoacán est le plus touché avec plus de 20 000 km² d'ores et déjà sévèrement érodés. Dans cette région comme dans beaucoup d'autres, l'érosion des sols contribue à la perte de terres cultivables et à la dégradation du système aquatique du fait de l'augmentation de la turbidité dans les cours d'eau et du transit des polluants, fixés sur les argiles. La sédimentation dans les barrages induit des surcoûts pour l'entretien des ouvrages et le traitement de l'eau de ville.

C'est dans ce contexte que nous avons entrepris une étude des flux sédimentaires à court, moyen et long termes, sur le bassin versant de Cointzio (Figure D.2.1).

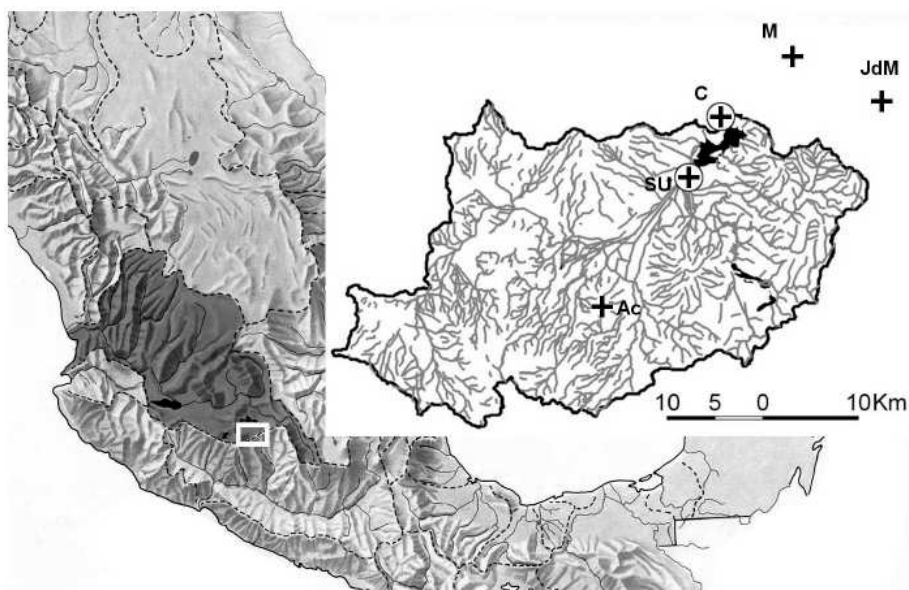


Fig. D.2.1. Localisation du bassin versant de Cointzio (650km²), situé sur les hauts plateaux volcaniques Mexicains, à l'aval de Morélia, capitale du Michoacán. A gauche, carte générale, à droite, le bassin versant et ces principales stations météorologiques. D'après Gratiot et al., 2010.

Constitué essentiellement de sols volcaniques (haut plateaux de la Sierra Madre), ce bassin est caractérisé par une anthropisation limitée, une couverture essentiellement distribuée entre agriculture, pâturage et forêts.

L'évolution pluriannuelle du cycle hydrologique a été abordée en examinant les débits fluides à l'exutoire du bassin versant (station hydrologique de Santiago Undaméo). Les archives historiques de la Commission Nacional del Agua ont été digitalisées et critiquées à partir des mesures hautes fréquences réalisées dans le cadre de nos actions de recherche en 2007, 2008 et 2009 (Gratiot et al., 2010). L'adaptation d'une méthode classique de séparation d'hydrogramme (Chapman, 1999 ; Nathan et McMahon, 1990) a été utilisée pour caractériser la part d'eau ruisselée de l'eau infiltrée puis exfiltrée. Les données de précipitations ont également été traitées et critiquées afin de disposer de bases de données cohérentes.

D'un point de vue météorologique, les régimes de précipitation sont restés remarquablement stable sur cinquante ans (Fig. D.2.2.a). Pour autant, les caractéristiques des débits fluides ne sont pas restées identiques et des changements significatifs ont été observés, notamment depuis le milieu des années soixante dix. Comme le montre la figure 2.2.b, la part d'eau ruisselée a augmenté significativement entre 1950 (30% du débit à l'exutoire) et 2005 (40% du débit à l'exutoire). Les événements exceptionnels de crues ont également augmenté en magnitude (jusqu'à 48 m³s⁻¹) et en instabilité (années très basses suivies d'années très hautes) (Fig. D.2.2.c).

L'analyse croisée de toutes ces informations a mis en évidence l'impact des modifications d'usages du bassin versant sur les caractéristiques fondamentales du cycle hydrologique, en particulier la partition entre l'eau de surface et l'eau de sub-surface (Gratiot et al., 2010). La projection des tendances actuelles dans le futur est un point essentiel que nous avons essayé d'aborder au travers de modèles climatiques (Fig. D.2.3).

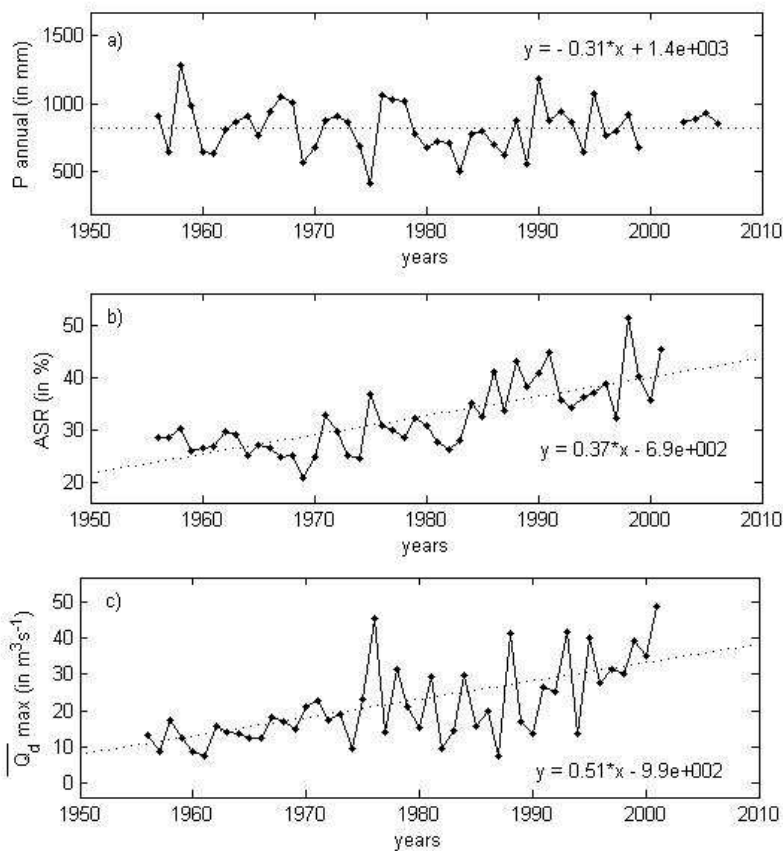


Fig. D.2.2. Evolution pluriannuelle (1950-2005) de différents paramètres hydrométéorologiques sur le bassin versant de Cointzio, Mexique. A) évolution des précipitations totales annuelles, station de Cointzio. B) Evolution du pourcentage annuel d'eau ruisselée à la station hydrologique de Santiago Undaméo. C) Evolution des crues maximales annuelles.

Le modèle utilisé est un modèle spline utilisant les modèles de circulation globale du Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Crookston, 2008 ; Saenz-Romero et al., in press.). Les projections laissent présager des précipitations à la baisse, de température à la hausse et donc d'un index d'aridité à la hausse (Fig. D.2.3). Ainsi, les conditions météorologiques futures devraient renforcer les conditions de ruissellement (versus infiltration) et ainsi accentuer les tendances engagées (Fig. D.2.2).

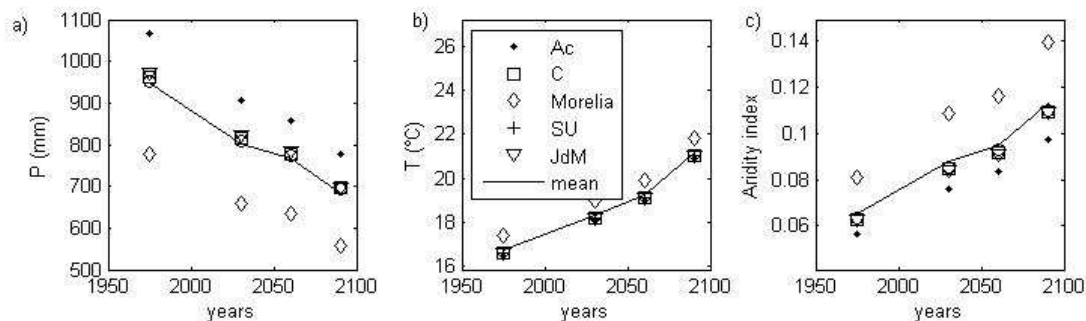


Fig. D.2.3. (a) Estimation des précipitations annuelles pour un climat contemporain (période 1961-1990) et pour une projection centrée sur les années 2030, 2060 et 2090. (b) Estimation des températures moyennes un climat contemporain (période 1961-1990) et pour une projection centrée sur les années 2030, 2060 et 2090. (c) Indice annuel d'aridité un climat contemporain (période 1961-1990) et pour une projection centrée sur les années 2030, 2060 et 2090. D'après Gratiot et al., 2010.

Dans le cadre d'une collaboration avec le Centre de Recherche sur la Géographie Environnementale (CIGA, Universidad Nacional Autonoma de Mexico), l'évolution de l'usage des sols, entre 1975 et 2003, a pu être caractérisée sous SIG (Figure D.2.4). Cette évolution révèle des changements très conséquents entre 1986 et 1996, changements que nous avons essayés de relier à l'érosion des sols par le biais d'archives sédimentaires (Lopez-Granados et al., in prep.).

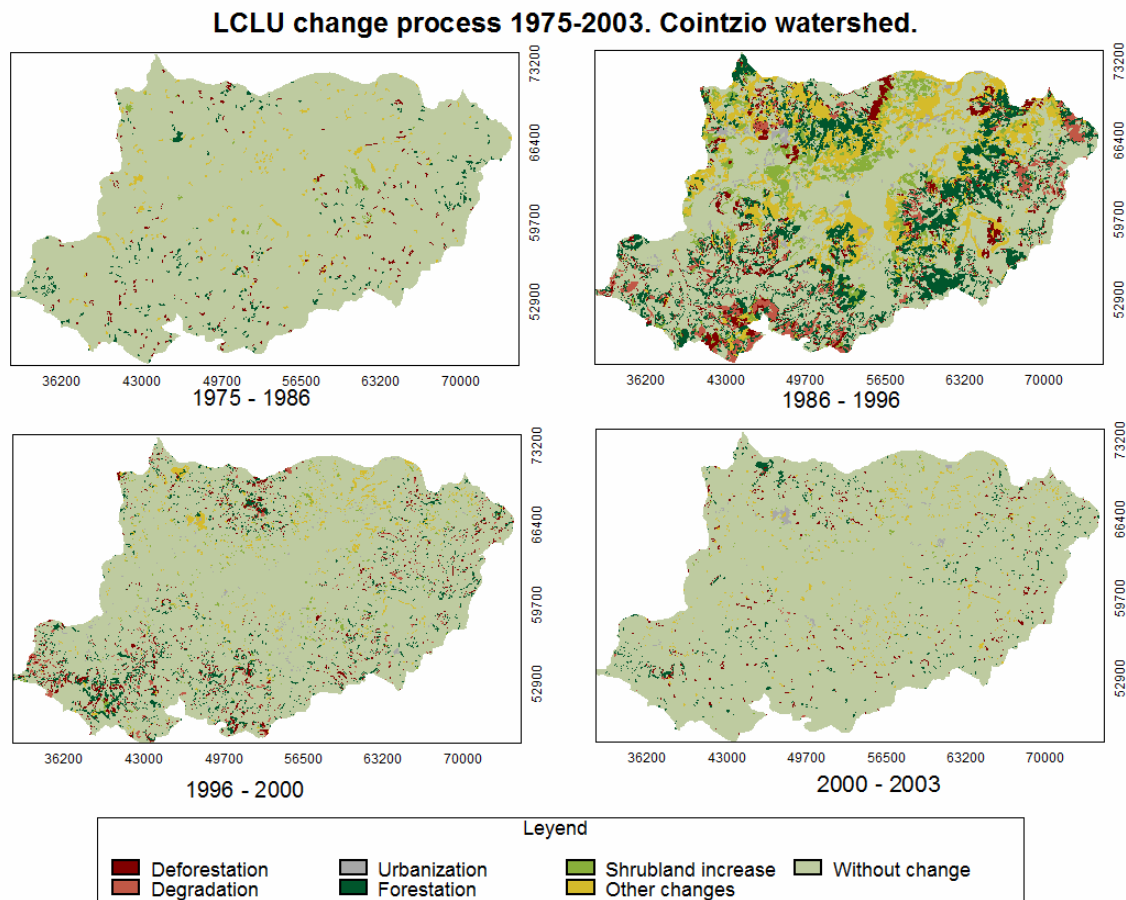


Fig. D.2.4. Carte de l'évolution de l'usage des sols entre 1975 et 2003. D'après Lopez-Granado et al., in prep.

L'évolution pluriannuelle des conditions d'érosion sur le bassin versant est estimée à partir de l'évolution pluriannuelle du taux de sédimentation dans le réservoir de Cointzio, à l'exutoire du bassin versant. Pour ce faire, une carotte sédimentaire de 130cm a été prélevée dans la partie la plus profonde du barrage de Cointzio (Fig. D.2.5).

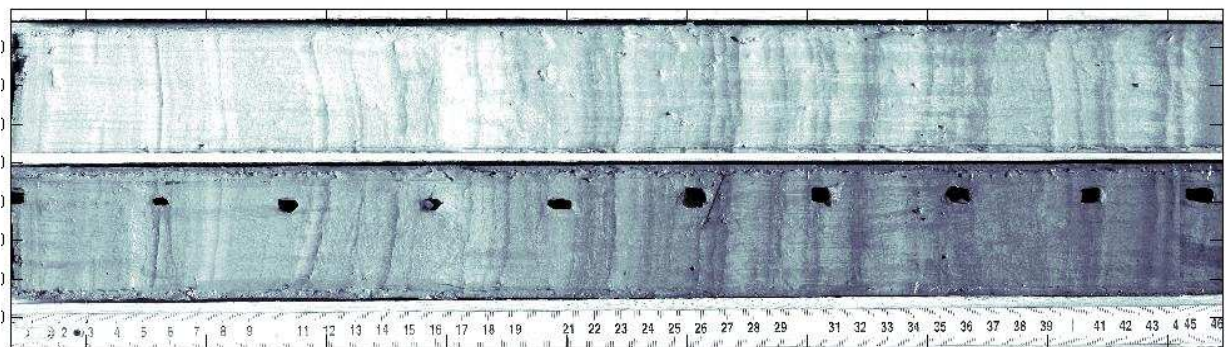


Fig. D.2.5. Extrait d'une photographie de la carotte sédimentaire COI09_1. Des lamines identifiant les apports sédimentaires successifs sont visibles sur les deux sous carottes. Les points noirs sur la demi carotte inférieure correspondent à des prélèvements pour estimation de la concentration en sédiment. La plein résolution de l'image est de 100 microns.

L'accumulation des sédiments, année après année, constitue un marqueur de la dynamique du bassin versant et de ses réponses aux forçages météorologiques (événements sévères de pluies et de crues) et anthropiques (modification des usages des sols). Le décompte des lamines observées aux rayons X a permis de reconstituer le taux de sédimentation entre 1974 et 2006 (Fig. D.2.6). L'analyse révèle deux périodes de sédimentation intense (environ 50 mm/an de 1975 à 1978 puis de 1990 à 1994) attribuées à des périodes d'intenses débits fluides dans la rivière.

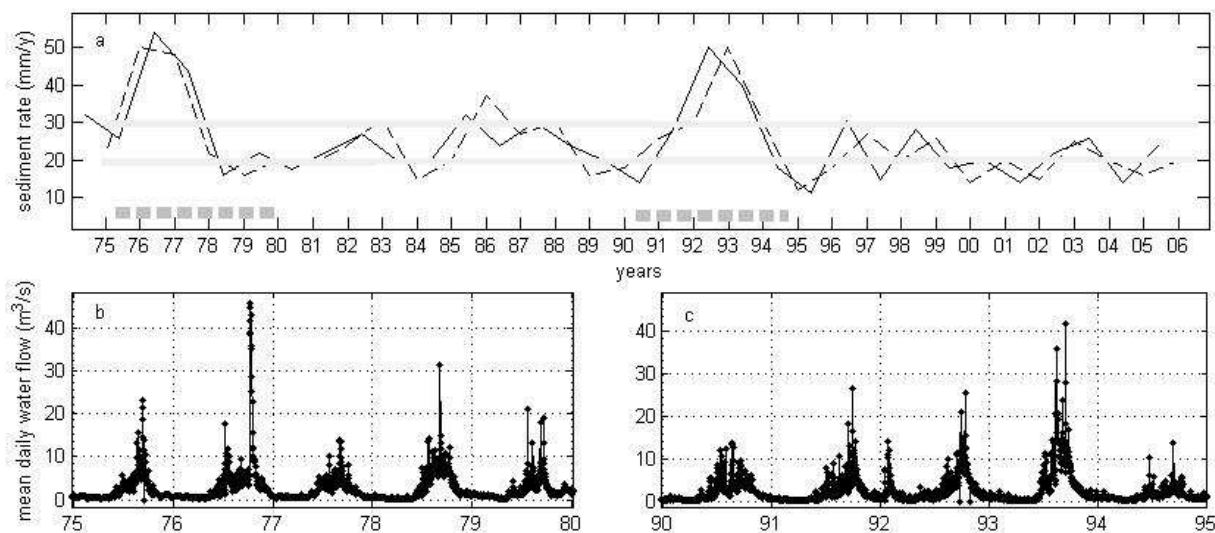


Fig. D.2.6.a) Evolution temporelle du taux de sédimentation dans la retenue de Cointzio entre 1975 et 2006. Les lignes en traits pleins et pointillés représentent l'estimation déduite d'une analyse aux rayons X d'une carotte sédimentaire prélevée dans le réservoir. B) Evolution du débit fluide moyen journalier entre 1975 et 1980. C) Evolution du débit fluide moyen journalier entre 1990 et 1995. D'après Lopez-Granados et al., in prep.

En conclusion, il semblerait que les forts changements d'usage des sols (déforestation, urbanisation, reforestation, aforestation ...) qui se sont produits sur le bassin versant aient généré à la fois des zones sources de sédiments et des zones de stockages, la tendance pluri-décennale étant stable et essentiellement marquée par de hauts taux de sédimentation lors de forçages hydrométéorologiques extrêmes.

3. Hydrodynamique sédimentaire et biogéochimie du réservoir de Cointzio (Susperregui et al., 2009 ; Susperregui et al., à soumettre ; Némery et al., 2009).

Dans cette région comme dans beaucoup d'autres, l'érosion des sols participe également à la dégradation du système aquatique du fait de l'augmentation de la turbidité dans les cours d'eau et du transit des polluants, fixés sur les argiles. Le couplage des processus hydro-sédimentaires et des cycles biogéochimiques gouverne le stockage puis le re-largage de polluants lors des phases de dépôts et d'érosion des vases.

Le barrage de Cointzio (Mexique) regroupe l'ensemble des problèmes précités et de fait a été proposé (puis sélectionné) comme site pilote du projet européen DESIRE (Desertification, Mitigation and Land remediations) et du projet ANR blanc STREAMS (Sediment Transport and Erosion Across Mountains). La qualité de son eau est essentielle puisque ce barrage contribue à hauteur de 30% de la ressource en eau potable de la région. En outre, il permet l'irrigation de nombreuses zones agricoles pendant la saison sèche.

De 2005 à 2009, nous avons opéré un suivi fin de l'hydrodynamique du réservoir de Cointzio (4km², 65Mm³) compléter en 2009 d'un suivi biogéochimique. Ces mesures de terrains visent à :

- Comprendre la dynamique des cycles biogéochimiques du réservoir de Cointzio et son impact sur l'écosystème.
- Modéliser cette dynamique pour générer des scénarios objectifs d'évolution des eaux du réservoir et optimiser sa gestion.

Les mesures ponctuelles réalisées en 2005 et 2006 ont permis une première caractérisation du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'exutoire du bassin versant de Cointzio (Susperregui et al., 2009). Le réservoir est un système de petite taille (faible volume en rapport au 650km² de bassin versant drainé) de type 'profond' (selon l'index de profondeur moyenne défini par Wetzel, 1983). Ces caractéristiques, couplées à un régime de pluie tropicale et à de très fortes turbidités induisent une dynamique saisonnière marquée (Figure D.3.1). En saison sèche, le caractère profond et turbide du lac limite les transferts radiatifs et une forte stratification verticale se met en place. Une fois la saison des pluies établie, l'apport massif d'eau froide conduit à un mélange très efficace avec des temps de transit des eaux très courts (probablement inférieurs au mois).

L'année 2009 a fait l'objet d'un suivi exhaustif des cycles biogéochimiques. Le réservoir de Cointzio est un excellent exemple de barrage sous influence humaine. La forte charge en sédiments fins induit des surcoûts pour la potabilisation de l'eau tant du fait de la quantité de particules transportées que du fait de sa pollution. Les éléments fixés aux particules d'argiles, notamment le phosphore (Table D.3.) conduit à des phases d'eutrophisation durant lesquelles l'anoxie est atteinte près du fond (Figure D.3.2).

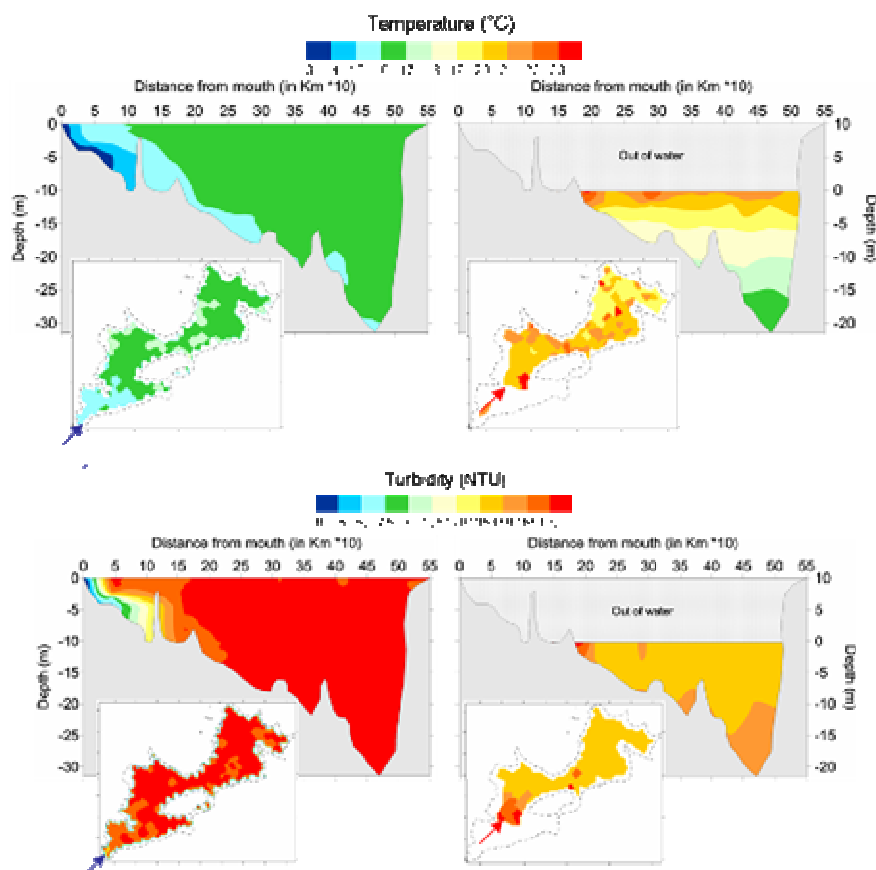


Fig. D.3.1: Hydrodynamique sédimentaire du réservoir de Cointzio, Michoacán. A gauche : conditions de température et de turbidité en décembre 2005. A droite, conditions de température et de turbidité en mai 2006.

Le suivi du réservoir s'est fait sur une base hebdomadaire pour les flux entrants et sortants et une base mensuelle pour la masse d'eau principale dont l'inertie est plus grande. Les paramètres suivis concernent l'hydrodynamique sédimentaire (profils de température, turbidité) et la

biogéochimie (conductivité, oxygène dissous, pH, Chlorophyll *a*, nutriments (P_{total}, PO₄³⁻, NH₄⁺, NO₃⁻)), de carbone organique dissous. Le phytoplancton et le zooplancton ont été suivi dans le cadre d'une collaboration avec l'Université fédérale du Michoana, San Nicolas de Hidalgo.

	Inflow tons y ⁻¹	Outflow tons y ⁻¹	retention %	export %
TSS	21466	2584	88	
Chla	0,7	0,2	71	
Ptot	21	30		-38
P-PO₄	5	3	43	
N-NO₃	63	40	36	
N-NH₄	5,3	5,2	1	
DOC	1078	1138		-6

Table D.31.: Imports et exports saisonniers de différents indicateurs biogéochimiques du réservoir de Cointzio durant l'année 2009. D'après Némery et al., 2009.

Le bilan annuel en terme de stockage, déstockage est présenté dans la Table D.3.1. Pour la plupart des indicateurs, le réservoir a une fonction de piégeage. Celle-ci est particulièrement marquée pour les matières en suspension (Total suspended sediment) avec près de 90% de stockage dans la retenue et pour la chlorophyll *a* (réduction nette de 71% entre l'entrée du réservoir et la sortie). Seul le phosphore total est en excès avec une quantité exportée supérieure de 36% aux apports.

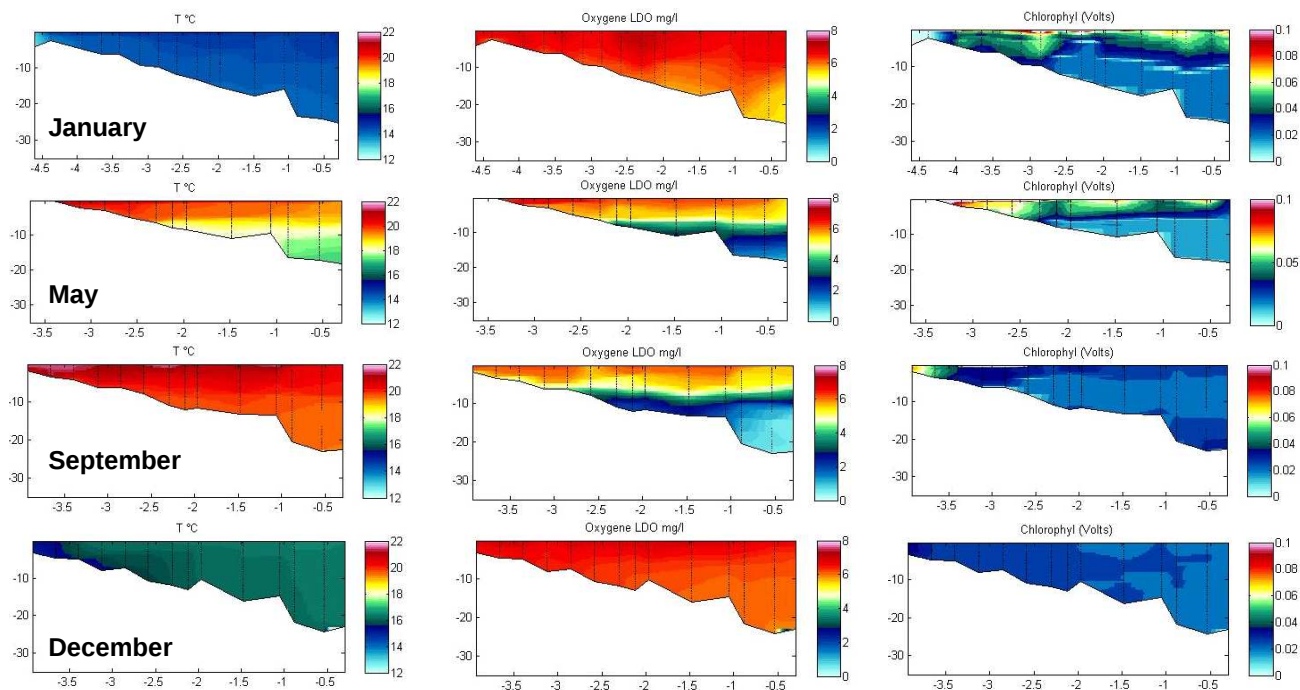


Fig. D.3.2: Evolution saisonnière de trois indicateurs biogéochimiques sur le réservoir de Cointzio durant l'année 2009. En abscisse figure la distance depuis le cours d'eau principal jusqu'au barrage (en km, 0 au barrage). En ordonnée figure la profondeur d'eau en mètre. A gauche, au centre et à droite, profils de température, oxygène dissous et chlorophyll *a*.

Le suivi mensuel de la colonne d'eau met en évidence les processus saisonniers (Fig. D.3.2). Le réservoir présente une phase principale de stratification thermique de mai à octobre. Le mélange des eaux est optimal entre octobre et avril, les températures de l'air étant suffisamment fraîches pour déstabiliser la colonne d'eau plusieurs nuits par semaine. Le brassage induit stimule la production de phytoplancton et de chlorophyll *a* dont les maxima sont observés entre janvier et août. Durant plusieurs mois de l'été, les conditions d'anoxie sont critiques sur la partie inférieure de la colonne d'eau. Avec un temps de résilience de l'ordre de l'année, le réservoir est très marqué par les crues qui se succèdent entre mai et octobre. Chaque crue réduit la pénétration de la lumière et accroît les charges en NH₄ et PO₄. Il en résulte un

développement caractéristique d'algues Euglenophytes et/ou Chsophytes qui reflètent l'eutrophisation temporaire du système (Némery et al., 2009).

4. Hydrologie et dynamique sédimentaire dans le bassin versant (Duvert et al., révisions mineures ; Evrard et al., soumis)

Sur le bassin versant (650km^2), le réseau hydro-météorologique a été complété progressivement pour obtenir une situation de suivi optimal en 2009 (Figure D.4.1.). Les analyses des cycles sédimentaires reposent sur le suivi continu de 10 pluviomètres (collaboration avec l'Université fédérale du Michoana, San Nicolas de Hidalgo), de 8 points mensuels de mesure du débit et de qualité et de cinq stations hydro-sédimentaire (débits fluide et solide toutes les 5 minutes).

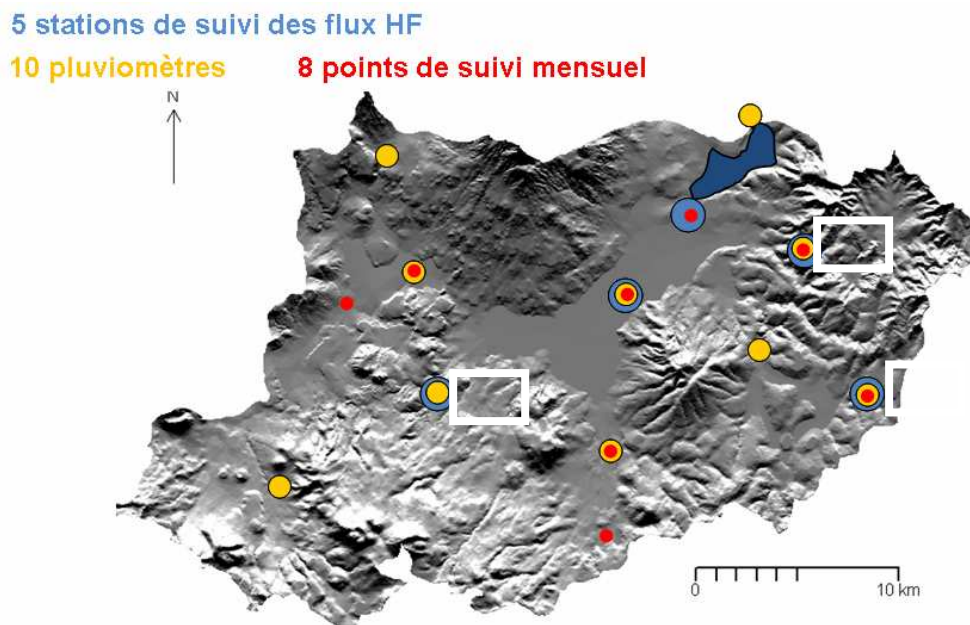


Figure D.4.1: Bassin versant de Cointzio et stations de mesure hydrologiques en place pour l'année 2009.

L'étude de la dynamique sédimentaire au sein du bassin versant repose sur une approche multidisciplinaire couplant l'hydrodynamique sédimentaire de terrain (avec suivi tel que décrit sur la Fig. D.4.1.), le traçage isotopique et géochimique (collaboration avec le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement) et la spectro-colorimétrie (collaboration avec le Centre Alpin sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes Lacustre). Les analyses en cours ont principalement concernées les sous bassins versants élémentaires de La Cortina, Huertitas et Potrerillos (Table D.4.1).

Soumis à des régimes de précipitations sensiblement équivalents, les trois sous bassins présentent des flux sédimentaires spécifiques très disparates, compris entre $30\text{ t.km}^{-2}.\text{y}^{-1}$ et plus de $1000\text{ t.km}^{-2}.\text{y}^{-1}$. Ainsi, les effets cumulés du type et de la couverture de sols se sont révélés être des facteurs de 1^{er} ordre pour le contrôle du flux sédimentaire tandis que l'intensité ou l'énergie des pluies n'est pas un facteur explicatif.

Station	2009 sediment delivery (tons)	Area (km ²)	Specific Suspended Sediment Yield (t.km ⁻² .y ⁻¹)
La Cortina	300	9.3	30
Huertitas	2600 ⁽¹⁾ 4600 ⁽²⁾	3.0	900 ⁽¹⁾ 1500 ⁽²⁾
Potrerillos	7400 ⁽¹⁾ 9500 ⁽²⁾	12.0	600 ⁽¹⁾ 800 ⁽²⁾

Table D.4.1: Flux sédimentaire annuel spécifique pour les trois sous bassins élémentaires. D'après Duvert et al., in press.

Du fait des conditions instrumentales difficiles (grande variabilité spatio-temporelle des paramètres, notamment la pluie), l'analyse des processus ne peut que difficilement se faire suivant une approche mécanistique pour laquelle les processus de forçages (type pluie, ruissellement, érodibilité, ...) seraient mesurés et confrontés directement aux réponses du système (débits fluide et solide). En fait l'approche statistique cumulant les observations successives de crues s'avère pertinente pour établir des liens de causalité et est fréquemment mise en œuvre. Suivant l'approche d'Escoufier (1979) et de Pagès (2004), nous avons pu définir une très bonne corrélation entre les débits fluides maximaux d'une part et les flux spécifiques crues à crues d'autre part. Pour les trois sous-bassins, ces deux paramètres sont assez bien reliés par une loi de puissance. Ce type d'approche présente bon nombre de limites qui nécessite quelques mises en garde, en particulier concernant l'auto-corrélation. Elle permet toutefois de cerner les processus les plus influents sur la dynamique de crue.

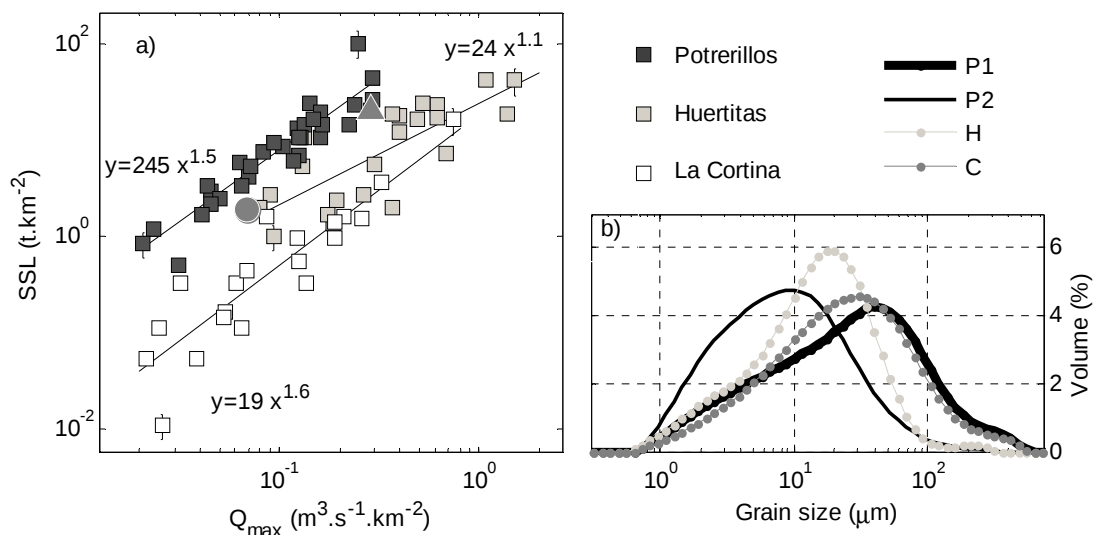


Fig. D.4.2: a) Relation entre le pic de débit fluide d'une crue et le flux spécifique intégré de la crue pour chacun des événements de crue observés en 2009 sur les bassins élémentaires de Potrerillos, Huertitas et La Cortina. Le triangle gris correspond à la crue du 19 juillet 2009 et possède la distribution granulométrique P1. Le rond gris correspond à la crue du 23 juillet et à la distribution granulométrique P2. b) Distribution granulométrique pour quelques événements de crues à Potrerillos (P1 et P2), Huertitas (H, 12 juillet 2009) et La Cortina (C, 14 juillet 2009). D'après Duvert et al., in press.

Dans le cas présent, nous pouvons constater que pour des débits de pics de crue semblables, le bassin versant élémentaire de la Cortina exporte environ dix fois moins de sédiments que le bassin versant de Potrerillos (Fig. D ;4.2.a). Par ailleurs, le bassin versant de Huertitas nécessite des débits fluides bien plus forts que celui de Potrerillos pour exporter des quantités de sédiments équivalentes. La nature des sédiments exportés n'est pas un facteur explicatif (du

moins en terme de granulométrie) et la variabilité des tailles de particules est plus importante d'une crue à l'autre que d'un bassin versant à l'autre. Notre étude nous a également conduit à revoir la typologie de crue classique (Williams, 1989). Selon cette typologie, l'évolution temporelle des couples $Q(t)$ - $SSC(t)$ définit des hystérésis dont le sens (horaire ou anti-horaire) renseigne sur les mécanismes d'arrachement et de transport de sédiments en précisant notamment la contribution relative des agrégats érodés sur les versants vis-à-vis des floes ou autres sédiments déjà stockés dans le lit du cours d'eau. Cette typologie s'est révélée peu discriminante pour nos petits bassins versants et nous a conduit à proposer une adaptation (Figure D.4.3.)

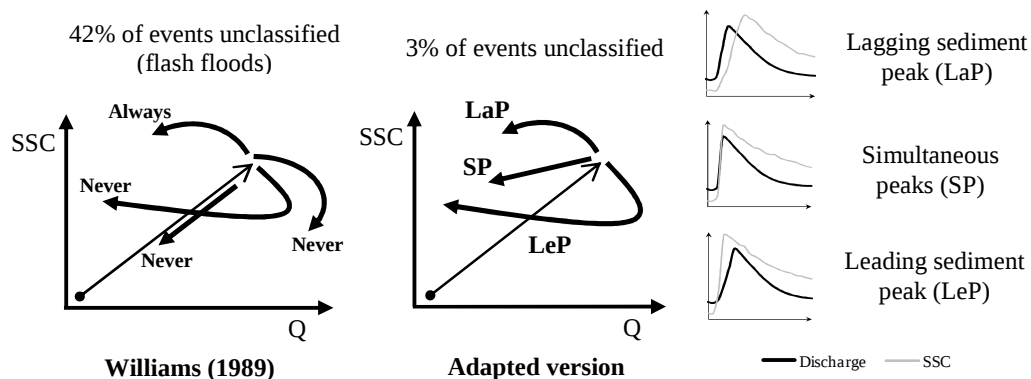


Figure D.4.3: Révision de la typologie de Williams pour discriminer les crues des petits bassins versants. D'après Duvert et al., in press.

Avec cette typologie, quasiment tous les événements de crues sont classés. En outre, les événements de Lagging sediment peak (LaP) et Simultaneous peaks (SP) se révèlent être peu nombreux dans l'année mais très actifs en terme de flux sédimentaire exporté (Fig. D.4.4). Cette diversité de comportement entre crues pour des bassins de très petites tailles (3 à 12 km²) (Figure D.4.2.b) met bien en évidence l'existence de phase de dépôts et reprises au sein du réseau hydrologique, même en têtes de bassins versants pour des granulométries très fines. Cette diversité de processus se propage t'elle aux bassins versants de méso-échelles (100-1000km²) ? Il s'agit d'une question importante que nous essaierons d'aborder dans les prochaines années (voir Partie E).

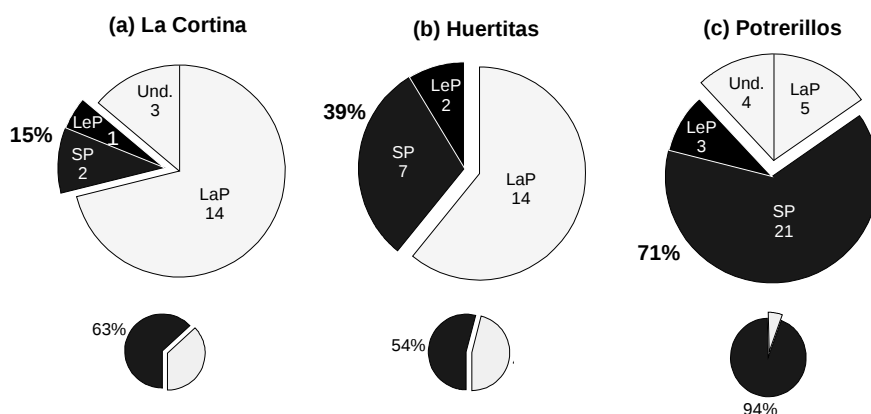
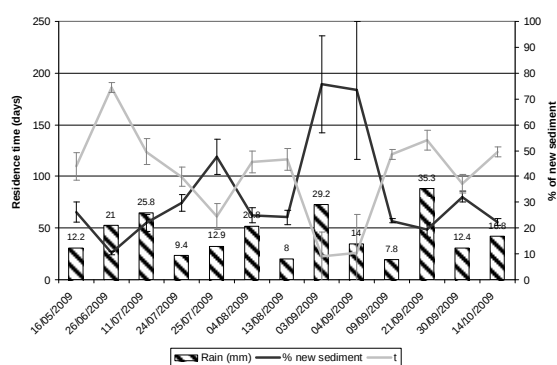


Fig. D.4.4. En haut, distribution du nombre de crues suivant la typologie présentée en Figure D.4.3. En bas, flux sédimentaire exporté par typologie de crues (LaP versus SP+LeP).

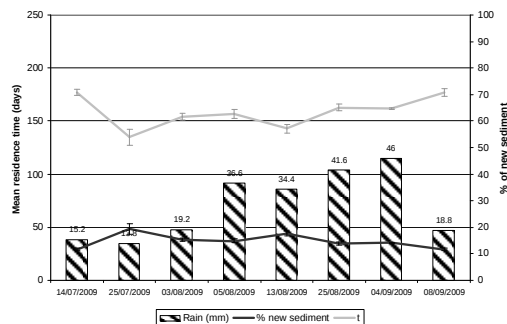
L'approche isotopique fournit une vision complémentaires quant à l'analyse de la dynamique sédimentaire (Evrard et al., soumis). En échantillonnant les sols des bassins versants, les sédiments déposés dans le réseau hydrologique et ceux prélevés par les échantillonneurs automatiques lors de crues, nous avons pu définir les temps moyens de résidence de sédiments sur les versants et dans le réseau hydrologique. L'approche mise en œuvre considère distinctement les sédiments directement dans le réseau hydrographique (compartiment rivière ou zones de ravines connectées) de ceux situés sur les versants.

En 2009, dans le compartiment rivière, les sédiments ont séjourné entre 50 (± 30) et 200 (± 70) jours (suivant le bassin versant considéré) tandis que les temps de transit s'échelonnent entre 5,000 ($\pm 1,500$) et 23,300 ($\pm 7,000$) ans dans le compartiment versant (Evrard et al., submitted). Pour les sédiments stockés dans la rivière, l'approche isotopique permet en outre de définir les sédiments récents (présent dans la rivière depuis moins de un an) et ceux stockés depuis l'an passé (Figure D.4.5.). Ces résultats sont obtenus en examinant le ratio entre le ^{210}Pb et le ^7Be selon la méthodologie proposée par Matisoff et al. (2005).

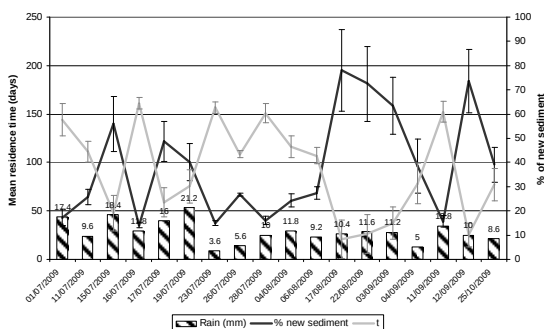
Les méthodes de spectrophotométrie, basée sur l'analyse du spectre de couleur (ou infra-rouge) des différents échantillons (sols, sédiments, Matières en Suspension) sont en cours et viendront compléter plus encore notre analyse. L'approche correspond à celle présentée par Poulenard et al. (2009) et se fait en collaboration avec cette équipe.



(a) Huertitas



(b) La Cortina



(c) Potrerillos

Fig. D.4.5. Age de sédiments (courbe grise) et % de nouveaux sédiments (courbe noire) pour l'ensemble des crues mesurées en 2009 sur les trois sous bassins versants (a, b, c). D'après Evrard et al., submitted).

E. Projet de recherche :

Au cours des quinze dernières années, j'ai eu l'occasion d'aborder la dynamique des sédiments cohésifs par des approches expérimentales, de terrain et spatiales. Les études ont porté tant sur les processus que sur des sites, depuis l'estuaire de la Gironde jusqu'aux plateaux volcaniques Mexicains (650km²) en passant par la côte de l'Amazonie (1600km de littoral).

Ces études m'ont permis de développer une approche multidisciplinaire, multi-échelles qui nourrit le projet de recherche que je souhaite développer. Ce projet est axé autour de trois points :

- 1) D'une part, la pérennisation des compétences acquises sur la dynamique sédimentaire lacustre en utilisant le modèle numérique ELMO 3D comme plateforme support. Ce travail sera réalisé en étroite collaboration avec J.Némery , collègue et spécialiste des cycles biogéochimiques (LTHE, équipe RIVER), M.P. Bonnet, développeur du modèle ELMO (LMTG, Toulouse et Brésil) et F. Guérin, spécialiste du cycle du méthane dans les systèmes lacustre (LMTG, Toulouse et Brésil).
- 2) Ensuite l'étude de la dynamique sédimentaire rapide dans les bassins versants montagneux. L'effort sera porté sur le développement instrumental en vue de mieux appréhender les processus physiques à partir de mesures de terrain. Ce travail sera réalisé en étroite collaboration avec les collègues du projet ANR STREAMS (notamment C.Legout et G.Nord, LTHE, équipe RIVER) et en collaboration avec le CEMAGREF dans le cadre de la mise en œuvre du Système d'Observation et de Recherche en Environnement (SOERE) Draix, Bléone. A noter qu'un soutien à l'international sera recherché auprès de I. Droppo (Chercheur au National Water Research Institute) pour les aspects instrumentaux et auprès des partenaires du projet européen DESIRE pour la mise en œuvre dans divers bassins versants.
- 3) Finalement, une réflexion sera menée sur la spatialisation de l'information et la pertinence de l'emboîtement d'échelles dans l'étude des bassins versants de montagne. Pour ce travail, nous rechercherons des appuis à la fois auprès de géomorphologues s'intéressant à l'évolution de la topographie des massifs montagneux (Crave, 2006), et auprès d'écologues s'intéressant aux hétérogénéités du paysage.

Ces trois points vont être développés ci-dessous. Notons que le point 2 sera la priorité et que les points 2 et 3 seront traités dans une gamme temporelle (1minute-1an) et une gamme spatiale (1-1000km²).

1. Modélisation hydro-sédimentaire et bio-géochimique des systèmes lacustres tropicaux

Les efforts conduits pour améliorer la compréhension des dépôts de sédiments cohésifs (section B) trouvent une application importante dans le domaine de la qualité d'eau. En effet, le couplage des processus hydro-sédimentaires et des cycles biogéochimiques gouvernent le

stockage puis le re-largage de polluants lors des phases de dépôts et d'érosion des vases. Jusqu'à 90% des contaminants présents dans les écosystèmes aquatiques sont stockés sur les sédiments fins. Ceux-ci sont principalement largués en été, lors des phases d'anoxie, avec des impacts négatifs pour l'ensemble de l'écosystème (Figure E.1.1.).

L'acquisition fine des paramètres gouvernant les processus hydrodynamiques, sédimentaires et biogéochimiques a été réalisée sur le barrage de Cointzio entre 2007 et 2009. Les mesures réalisées tous les quinze jours à l'aide d'une sonde multi-variables ont été couplées à des mesures continues de la distribution verticale de la température afin de suivre au mieux les phases de stratification et de dé-stratification (Figure D.3.2.). Nous souhaitons mettre à profit cette base de donnée importante pour appliquer et améliorer, si besoin, le modèle numérique ELMO 3D (Bonnet et al., 2001). En particulier nous souhaitons reproduire le fonctionnement biogéochimique (distribution 2D verticale de la chlorophylle *a* et des éléments nutritifs) en périodes sèches et humides et évaluer la variabilité spatiale (profil vertical) et temporelle (mensuelle) de la qualité biogéochimique des eaux du lac (O_2 , N, P, Si).

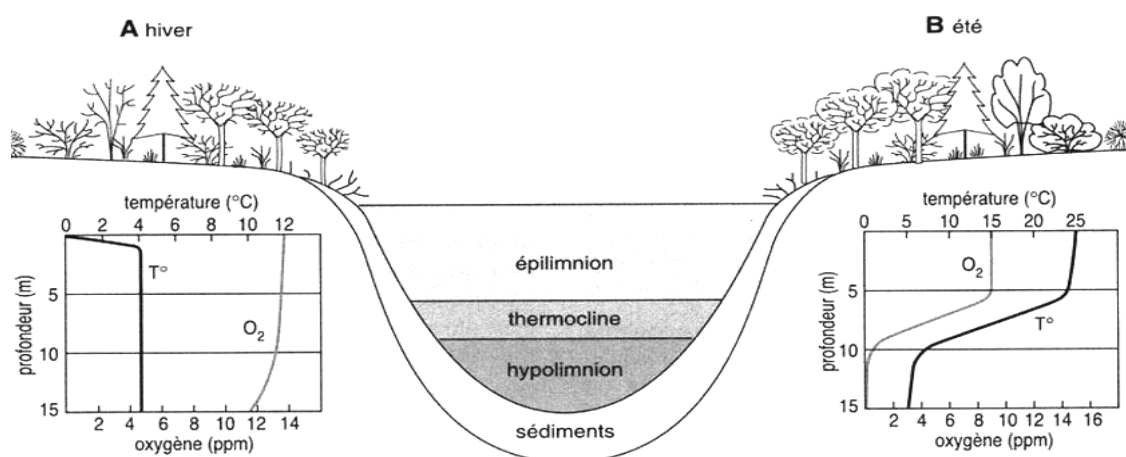


Fig. E.1.1.. Stratification thermique des écosystèmes limniques. Schéma montrant les principales caractéristiques physicochimiques propres à un lac stratifié. A) Stratification hivernale. B) Stratification estivale. (D'après Deevey in : Krebs, *Ecolgy*, Harper Collins, ed., 1994. p471).

- La comparaison du modèle avec les données de terrain sera l'occasion de critiquer la qualité des algorithmes qui lient le flux de chute ϕ des sédiments cohésifs aux caractéristiques biogéochimiques du réservoir. Les enjeux associés à cette modélisation concernent non seulement les nutriments mais également les gaz à effet de serre (CH_4 et le CO_2). A l'échelle globale, les barrages contribueraient respectivement à 12% des émissions anthropiques de CH_4 , et 90% de ces émissions auraient lieu en zone tropicale (Guérin, communication personnelle).

2. Blocages technologiques et conceptuels quant à l'analyse des flux particuliers dans les bassins versants de petite taille (1-100km²)

Force est de constater qu'une différence importante subsiste quant à l'étude de la dynamique sédimentaire dans les masses d'eau pérennes d'une part (océan, littoral, estuaire, rivières) et sur les surfaces continentales d'autre part. Les communautés scientifiques s'intéressant aux flux

sédimentaires depuis les versants jusqu'aux océans ont depuis plusieurs décennies appréhender le problème à partir de lois physiques liant les caractéristiques des particules à celles du fluide porteur (hydrodynamique sédimentaire). En dehors de la communauté des géomorphologues, s'intéressant à la dynamique sédimentaire au pas de temps géologiques (Crave and Davy, 2001 ; Simpson and Castellort, 2006), l'approche physique reste un enjeu majeur sur les bassins versants de méso-échelles (Prosser et Rustomji, 2000 ; Nord and Esteves, 2005, 2007 ; Crave, 2006). Ainsi, la majorité des études de la dynamique sédimentaire rapide en bassin versant repose sur une formulation semi-empirique pouvant se ramener à l'équation proposée par Prosser et Rustomji (2000) :

$$Q_s = k_1 Q^\beta S^\gamma$$

Avec $Q(t)$ le débit fluide, $Q_s(t)$ le débit solide, S le gradient d'énergie local (souvent assimilé à la pente locale) et k_1 , β et γ des constantes spécifiques au site d'étude. Dans les cas les plus défavorables, les termes de l'équation précédente sont déduits uniquement de considérations topographiques (Prosser et Rustomji, 2000). Dans les cas les plus favorables, $Q(t)$, $Q_s(t)$ (et parfois S) sont mesurés à haute fréquences.

Pour notre projet de recherche, nous souhaitons tendre vers une approche mécanistique des flux particuliers dans les bassins versants de petite taille. Cette approche reposera sur des connaissances physiques que nous avons présentées en section B. Après avoir développé plus spécifiquement certains des processus physiques qui régissent la dynamique sédimentaire, nous présenterons les développements instrumentaux que nous souhaitons mettre en œuvre pour pallier les difficultés de mesures actuelles.

Le diamètre du sédiment et sa vitesse de chute constituent des données capitales pour la description physique de l'interaction entre les sédiments et le fluide (voir section B.2.). Couplées à des mesures de la phase fluide, ces données permettent de calculer les nombres adimensionnels qui caractérisent l'écoulement, notamment le paramètre de Shields, le nombre de Rouse et le nombre de Richardson :

- Le paramètre de Shields θ_{cr} définit les conditions de remise en suspension d'une particule déposée. Ce nombre met en balance la force tractrice (τD^2) de l'écoulement et la force de résistance au frottement (proportionnel au poids réduit de la particule, selon un modèle solide de Coulomb). Selon la valeur adimensionnelle du diamètre des grains, la condition de mise en mobilité des sédiments est définie par une valeur de θ_{cr} comprise entre 0.2 et 0.012 (Figure E 2.2).

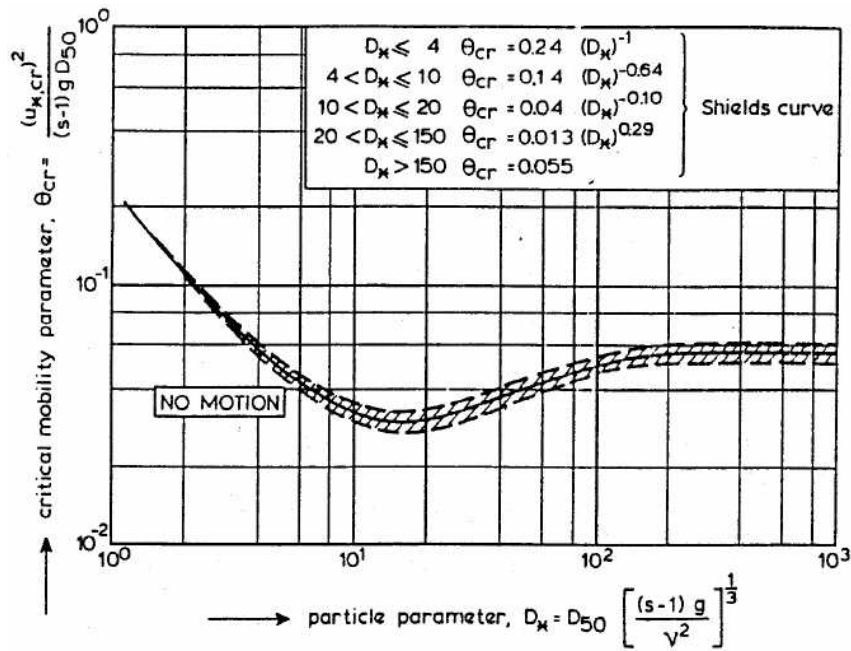
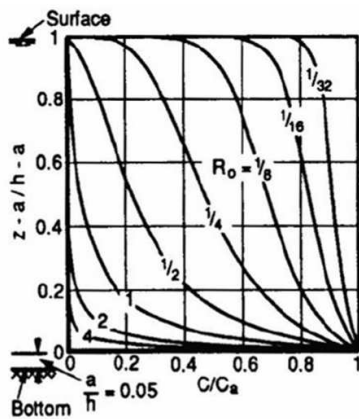


Fig. E.2.2. Initiation du mouvement (diagramme de Shields). D'après Van Rijn, 1985.

- le nombre de Rouse $Ro = w_s / K u_*'$, ratio de la vitesse de chute d'une particule à la vitesse turbulente de l'écoulement. Il intervient dans la solution mathématique de l'équation de transport de la concentration sédimentaire en écoulement cisailé uniforme permanent à surface libre (Figure E.2.1, équation à droite). Le nombre de Rouse montre qu'il existe un lien fort entre les caractéristiques individuelles des sédiments et la distribution de la concentration massique (rigoureusement volumique).



$$\bar{C}(z) = C_a e^{-\left(\frac{w_s}{u_*'} \frac{z}{l}\right)}$$

Fig. E.2.3.. Profil de concentration en sédiments à l'équilibre pour $a/h=0.05$. D'après Julien (1998).

- Le nombre du Richardson de gradient $Ri = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \frac{g \partial C / \partial z}{\rho_w (\partial u / \partial z)^2}$

qui compare l'énergie potentielle associée aux stratifications naturelles de l'écoulement (par charge sédimentaire) à l'énergie turbulente de cisaillement, susceptible de mélanger cette stratification.

Le nombre de Richardson fait intervenir la vitesse de chute et le diamètre des sédiments indirectement au travers de la distribution verticale de la concentration massique $C(z)$, comme

illustré sur la figure E.2.3. Il permet une description macroscopique de l'interaction fluide-sédiments. Il a permis de montrer que les sédiments constituent également des acteurs actifs de la modification de l'écoulement (Winterwerp, 2001 ; Michallet et Mory 2004).

Suite à cette introduction, on comprend mieux la nécessité de caractériser non seulement la distribution spatio-temporelle de la concentration en sédiments, mais également leurs vitesses de chute et leur granulométrie *in situ*.

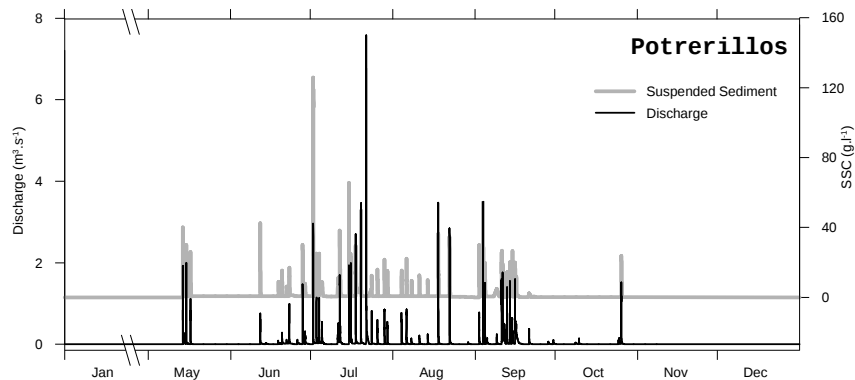


Fig. E.2.4. Evolution des débits fluides et des concentrations de matières en suspension sur le sous bassin versant de Potrerillos (9km²) pendant l'année 2009.

Comme l'illustre la figure E.2.4, les écoulements de petits bassins versants sont généralement éphémère et fortement turbide. Cela limite considérablement les possibilités d'application directe des lois impliquant les nombres adimensionnels précités :

- 1) **D'un point de vue physique**, la forte turbidité conduit, au delà de quelques grammes par litre, à des interactions fortes entre les particules et à un phénomène d'entravement de la vitesse (section B, Figures B.2.3 et B.3.2). Ainsi les vitesses de chutes effectives des sédiments et les caractéristiques générales de l'écoulement s'en trouvent fortement modifiées (Gratiot et al., 2005 ; Sottolichio et al., en révision). En particulier, des processus d'hyper sédimentation peuvent se produire pour des particules très fines du fait des effets de stratification de la colonne d'eau (Winterwerp, 2001). Le nombre de Rouse, qui repose sur l'hypothèse d'un régime permanent et d'une distribution monoclasse des sédiments (sans processus de floculation/defloculation) ne suffira pas à la description des écoulements rapides, tel qu'illustré sur la figure E.2.4. Le nombre de Richardson constituera un bon outil en complément d'analyse.
- 2) **D'un point de vue instrumental**, la furtivité des écoulements des petits bassins versants de montagne et leur grande turbidité compliquent notablement les possibilités d'estimation *in situ* de la vitesse de chute et du diamètre des sédiments. Les méthodes laser (type LISST, Malvern de laboratoire) et vidéos (Fennessy et al., 1994), qui ont été fréquemment utilisées en zone estuarienne et côtière (Fennessy et al., 1994 ; Mikkelsen et al., 2001 ; Jouon et al., 2008), sont mises à défaut lorsque la concentration en sédiments excède quelques centaines de mg/l. Dans la plupart des études, granulométrie et vitesse de chute sont donc déduites *à posteriori* en laboratoire. Cette approche est périlleuse parce que les agrégats, floes et autres

particules sont facilement modifiés, voire détruits, dès lors qu'on les transporte. Par conséquent, les estimations issues d'analyses de laboratoire sont largement sujettes à caution et se révèlent dans la plupart des cas de peu d'intérêt pour déduire précisément les conditions sédimentaires *in situ* (Phillips et Walling, 1995, Williams et al., 2007).

Pour pallier ces difficultés, nous souhaitons développer dans les années à venir un instrument spécifique, couplant des fonctionnalités de prélèvement automatique lors des crues à des mesures optiques de la vitesse de chute d'ensemble des particules prélevées. Cet appareil permettra d'acquérir des informations sur la vitesse de chute des sédiments cohésifs présents dans l'écoulement pour différentes périodes critiques au sein d'une crue, et ce, quel que soit la concentration en sédiment dans la gamme 1-100 g/l. Le développement d'un prototype est prévu pour 2011 au sein du laboratoire LTHE. Cet appareil fournira des mesures jusqu'alors non disponibles et devrait améliorer notre compréhension physique de la dynamique sédimentaire.

Outre les considérations mécanistiques, les données morphométriques des particules permettent aussi de tracer, sous certaines conditions, l'origine des sédiments. En plus de la vitesse de chute et de la granulométrie, d'autres caractéristiques morphométriques telles que l'oblicité, la rugosité, ou encore la dimension fractale sont également considérées pour tracer l'origine des sédiments (Figure E.2.5). A titre d'exemple, Droppo et al. (2005) et Williams et al. (2008) ont identifié des différences significatives entre les agrégats de sols fraîchement arrachés et les flocs présents dans l'environnement aquatique (Figure E.2.6). Blake et al., (2007) ont, pour leur part, pu discriminer les particules issues de zones de versants brûlés parmi l'ensemble des agrégats transportés par la rivière. Dans la section B, nous avons présenté différents résultats qui montrent également une différence significative de la distribution des flocs dans un graphe D_f , w_i suivant que la floculation est purement minérale ou liée à de la matière organique (Figure B.3.6, Gratiot et Manning, 2004, Gratiot et Manning, 2008).

Ces éléments, couplés à d'autres outils tels que la spectro-colorimétrie et la géochimie isotopique, nous ont permis et nous permettront de progresser plus encore dans la compréhension de la dynamique sédimentaire dans la bassin versant (Poulenard et al., 2009 ; Evrard et al., *submitted*)

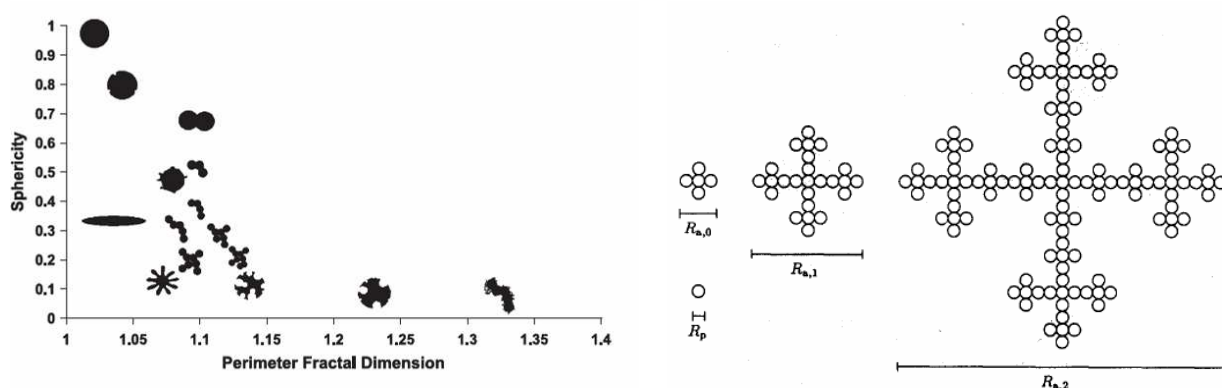


Fig. E.2.5. A gauche, diversité conceptuelle des caractéristiques morphométriques des sédiments dans un environnement aquatique. D'après Droppo et al., 2005. A droite, schéma conceptuel d'ordre d'aggrégation et de dimension fractale. D'après Winterwerp (pers. Comm.).

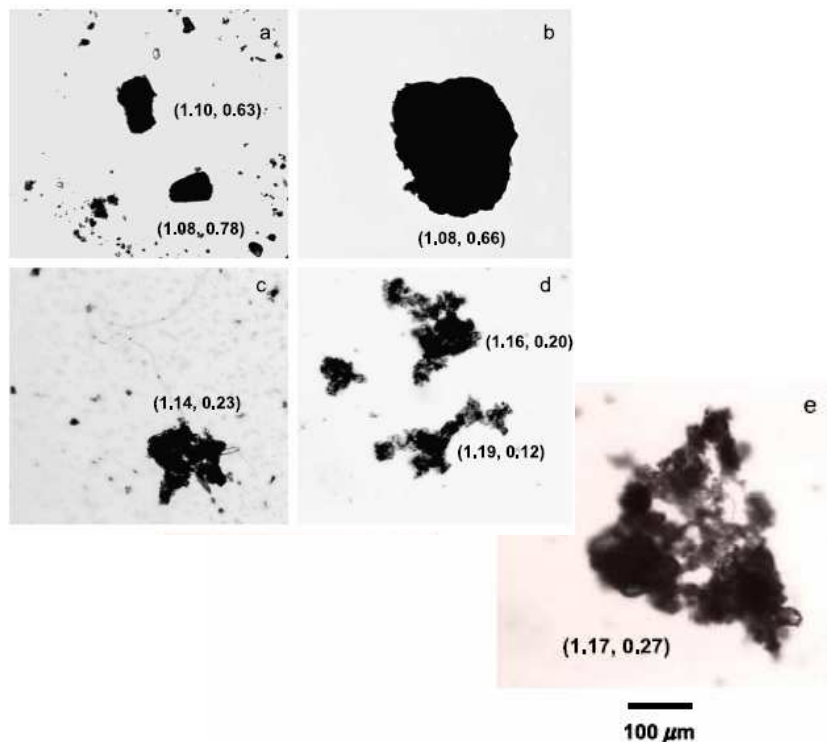


Fig. E.2.6. Diversité de dimensions fractales et de sphéricités (nombres entre parenthèses) de particules dans la rivière Dart, Angleterre. A) agrégats érodés sur une zone labourée, b) agrégat issu d'une zone de paturage, c) floc en écoulement à débit de base basal, d) floc en écoulement turbide de crue, e) floc ayant subi différentes phases d'érosion-resuspension dans l'écosystème aquatique. D'après Droppo (2005).

3. Echelles de processus et similarité

Complexité des flux sédimentaires sur les surfaces continentales

La complexité de l'interaction fluide-sédiments que l'on peut observer à l'exutoire d'un bassin versant (section E.2.) est le fruit de très nombreux facteurs physiques, biologiques, géomorphologiques, anthropiques, pédologiques, géologiques et hydro-météorologiques dont on ne saura comprendre l'interaction sans assimilation de données spatialisées. Comme le montre la figure E.3.1, les pas de temps et d'espace auxquels doivent être rafraîchies ces informations sont très variables suivant le facteur considéré. Les données de pédologie et de géologie sont très difficiles à estimer du fait de leur variabilité spatiale et des problèmes intrinsèques de mesures (on pense notamment à l'épaisseur de sol). Toutefois, elles peuvent être considérées comme pérennes dans bon nombre d'application si bien qu'une seule carte sera nécessaire. A l'inverse, l'assimilation des précipitations doit se faire à des échelles spatiales de l'ordre du kilomètre et des échelles temporelles n'excédant pas la demi-heure si l'on souhaite comprendre la réponse hydrologique d'un bassin versant lors de crues éclairs (Borga et al., 2008). Si une telle précision est aujourd'hui technologiquement envisageable (grâce aux techniques RADAR), son application en routine, à l'échelle planétaire, nécessitera plusieurs décennies.

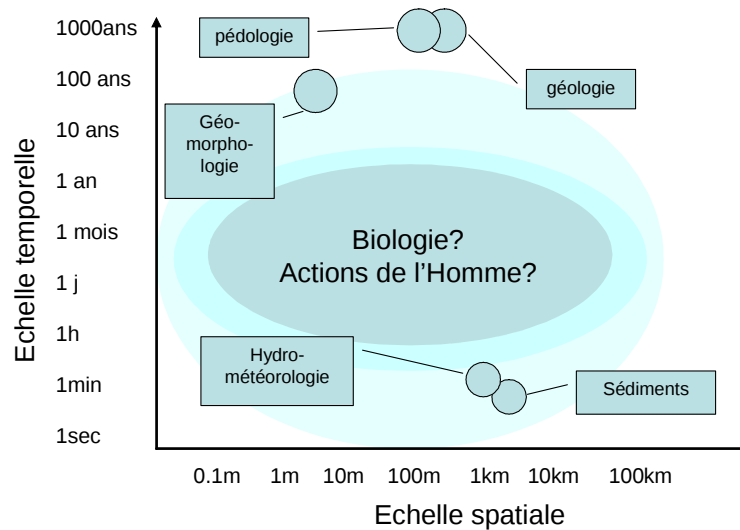


Fig. E.3.1. Assimilation de données à des échelles spatio-temporelles raisonnables et adaptées pour les principaux facteurs de forçages de la dynamique sédimentaire en bassins versants.

Les caractéristiques liées aux activités anthropiques et biologiques présentent, quant à elles, des variabilités à toutes échelles spatiales et sont temporellement très marquées à l'échelle saisonnière. Ainsi, la mise en culture, le pâturage ou les cycles biologiques naturels sont autant d'éléments qui modifient notablement les caractéristiques des surfaces continentales avec une répercussion certaine sur les enregistrements des flux sédimentaires aux exutoires des bassins versants. Les laminations saisonnières des carottes sédimentaires lacustres révèlent l'impact de la saisonnalité des flux sédimentaires sur l'érosion et le transport à mésoéchelle (Fig.D.2.5). A plus petite échelle, le suivi hydro-sédimentaire aux exutoires des sous-bassins versants (Potrerillos, 12km², La Cortina, 9km² et Huertitas, 3km²) conforte l'information :

Sur nos petits bassins mexicains, les fortes pluies se produisent de mai à octobre. Elles génèrent systématiquement des crues rapides, plusieurs fois par semaine (Fig. E.2.4). Les flux sédimentaires associés sont reportés sur la figure (E.3.2.a). Pour les sites de La Cortina et Potrerillos, on observe une diminution du flux sédimentaire au cours de la saison. L'observation de l'ensemble des couples débits-SSC (Fig. E.3.2.b et E.3.2.c) complète pertinemment l'analyse. Tout au long de la saison des pluies, les débits fluides observés à l'exutoire restent tout à fait comparables, compris entre 10⁻² et 10 m³.s⁻¹. Par contre, les charges solides exportées en seconde partie de saison (symboles en gris) sont systématiquement réduites par rapport à celles transportées en début de saison.

Il s'agit bien là d'une mesure directe de l'impact des cycles biologiques (naturels et/ou soumis à l'action de l'homme) sur la dynamique d'export des sédiments (et éléments associés).

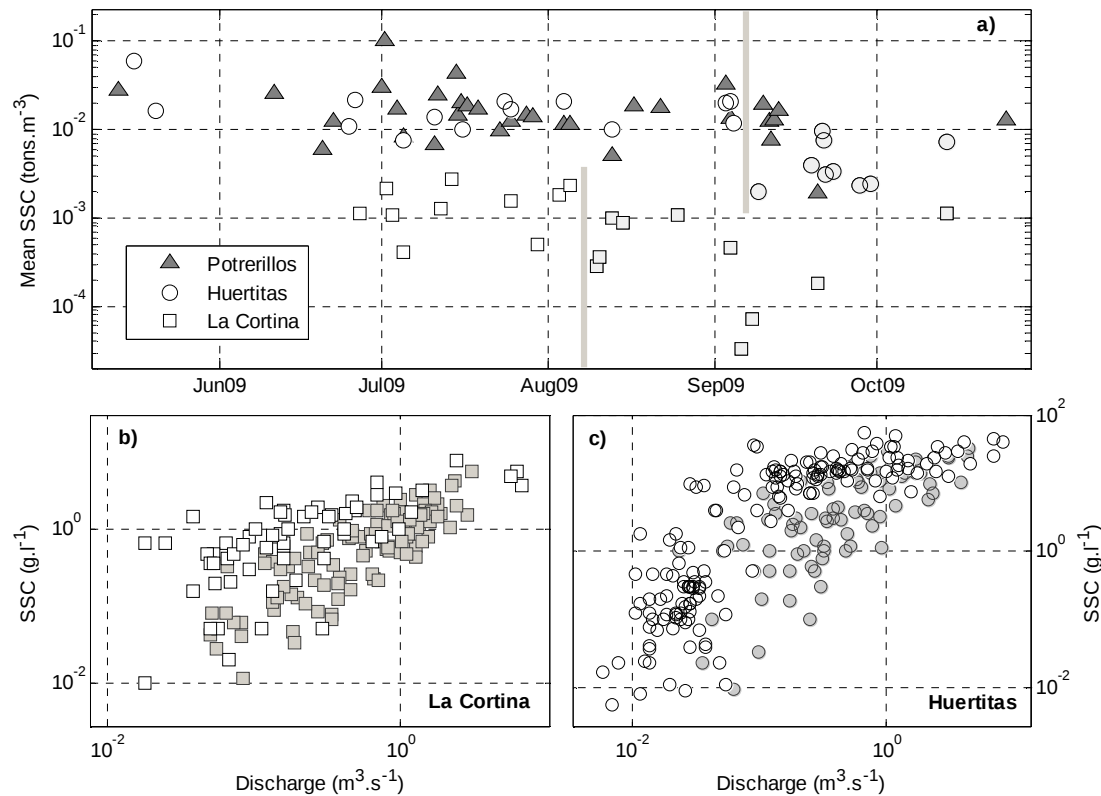


Fig. E.3.2. Illustration des effets saisonniers sur les flux sédimentaires. A) concentration moyenne en sédiments en suspension pour chaque événement de crue au cours de l'année et pour chacun des trois sous bassins versants élémentaires suivis. Les bassins versants de La Cortina et Huertitas montrent une chute importante des exports sédimentaires au cours de l'été. La date associée est symbolisée par des barres verticales grises. D'après Duvert et al., in press.

La difficulté à mesurer tous les facteurs (présentés sur la figure E.3.1.) aux bonnes échelles spatiales et temporelles conduit à deux approches scientifiques divergentes :

L'approche déterministe, qui vise à agréger des lois de comportements de mécanique des fluides, des sols, d'hydraulique au sein de modèles numériques. Cette approche repose sur une base analytique dont la philosophie considère une solution unique pour un forçage considéré. Suivant cette approche, la caractérisation de la dynamique sédimentaire et sa mise en équation se fait principalement à l'échelle élémentaire ($O(1 \text{ m}^2)$) afin de contraindre suffisamment les conditions limites et les conditions initiales du système. Cette démarche est justifiée par la question suivante :

Si je ne comprend pas, ou si je ne sais pas mesurer, les processus à l'échelle élémentaire (parcelle, m² de sol, ravine élémentaire), comment puis-je espérer caractériser les processus à plus grande échelle ?

L'approche purement déterministe peut trouver un champ d'application très important dans les domaines pour lesquels

- d'une part, les processus en jeu mesurés à petites échelles sont ceux qui régissent les écoulements et la dynamique sédimentaire à plus grande échelle,
- d'autre part, les hétérogénéités en jeu sont en similarité depuis les petites jusqu'aux grandes échelles.

Au cours des dernières années, l’océanographie physique et la météorologie ont largement bénéficié de cette approche. Les communautés scientifiques correspondantes ont su coupler des méthodes d’assimilation de données à des modèles numériques reposant sur la description physique des équations fondamentales de la dynamique. L’application d’une telle approche aux surfaces continentales de 1-1000 km² reste utopique, principalement parce qu’elle bute sur des problèmes d’hétérogénéités spatiales dans une large gamme d’échelles spatiales (environ depuis le micron jusqu’à 100km ou plus).

Par exemple, on comprend bien qu’il sera difficile de renseigner avec certitude une épaisseur de sol en toutes mailles d’un bassin versant de méso-échelle. De la même manière, la mesure et l’intégration des champs de pluies seront de véritables challenges. Ainsi, les modèles numériques à base physique sont confrontés à de nombreuses difficultés liées à l’assimilation de données, l’erreur de mesure et l’équifinalité (Beven and Freer, 2001).

Id	Description	Analysis and/or hypothesis	Literature studies
E1	Choice of a suitable turbidimeter	We verified that the turbidometer was well suited to the study river characteristics	Wren <i>et al.</i> (2000), Downing (2006)
E2	Turbidity and water level acquisition frequency	A 10 minutes time step was supposed to be well adapted to survey the sediment transport dynamics for the studied basin	Phillips <i>et al.</i> (1999), Coynel <i>et al.</i> (2004), Moatar <i>et al.</i> (2006)
E3	Turbidity signal fluctuations	We measured the mean turbidity, standard error and min.-max. values during one minute each 10 minutes time step	Joannis <i>et al.</i> (2010)
E4	Homogeneity of SSC at the sampling cross-section	We supposed that SSC was homogeneous at the cross-section scale for the majority of the flood events	Horowitz <i>et al.</i> (1989), Horowitz <i>et al.</i> (1999), Horowitz (2008), Steegen and Govers (2001), Gray and Gartner (2009)
E5	Technical problems (e.g. sensor silting, empty battery, data logger failure)	The cross-section was stable enough with high velocity to reduce the risk of sensor silting; the sensor fouling was considered through the analysis of turbidity fluctuations. GSM and solar panel were used to reduce these problems and data lacks	Wren <i>et al.</i> (2000), Downing (2006), Lewis and Eads (2008)
E6	Automatic sampling procedure	We quantified the statistical uncertainty in laboratory for a wide range of SSC [0-150 g/l]	Lewis (1996), Horowitz <i>et al.</i> (1999), Horowitz (2008), Gray and Gartner (2009)
E7	Laboratory analysis	We quantified the statistical uncertainty in laboratory for a wide range of SSC generally observable in mountains	Gautheron (1994), Gray <i>et al.</i> (2000), Orwin and Smart (2004), Clark and Siu (2008)
E8	Turbidimeter calibration	We considered the dispersion of data with the calibration curve in relation with the laboratory uncertainties (UE6-7) and the turbidity fluctuations (UE3)	Foster <i>et al.</i> (1992), Riley (1998), Brasington and Richards (2000), Lenzi and Marchi (2000), Orwin and Smart (2004), Pfannkuche1 and Schmidt (2003), Downing (2006), Minella <i>et al.</i> (2008), Lacour <i>et al.</i> (2009)
E9	Discharge estimation: water level and rating curve	Different range of global uncertainties were considered in this study: 5, 10 and 20%	Sauer and Meyer (1992), European ISO EN Rule 748 (1997)

Table. E.3.1. Les différentes sources d’erreurs associées à l’estimation du flux sédimentaire dans les bassins versants. D’après Navratil *et al.*, (in prep.).

La seconde approche est l’approche statistique. Plus pragmatique, elle vise à définir la réponse d’un bassin versant parmi un ensemble de possibles auquel une probabilité d’occurrence aura été affectée. Cette approche considère que les difficultés inhérentes à la mesure du forçage ne permettent pas de contraindre entièrement une démarche de modélisation analytique. Dès lors, l’erreur sur la mesure d’un ou plusieurs paramètres est prise en compte de manière probabiliste, sur la base de répétitions avec un jeu de paramètres de forçage proche. Cette approche peut correspondre à l’application de la méthode de MonteCarlo que nous avons

mise en œuvre pour définir l'erreur finale sur la mesure des flux sédimentaire, à partir du cumul de toute une série d'erreurs (Table E.3.1.). A cette table pourrait s'ajouter l'évolution des erreurs et des flux en fonction de la durée de mesure (commentaire lors de la soutenance).

L'approche statistique est largement utilisée par toutes les communautés intéressées par une hydrologie opérationnelle et présente des avantages incontestables tant en terme de mise en œuvre que d'outils de communications entre les différents acteurs du risque hydrologique et de sa gestion (Houdant, 2004).

Hétérogénéités spatiales

Une manière quelque peu fantaisiste d'illustrer l'hétérogénéité spatiale des surfaces continentales consiste à envisager une analogie de formes entre un petit bassin versant et une série de visages (Fig. E.3.3).



Fig. E.3.3. Problème d'hétérogénéités spatiales. Analogie de formes entre bassin agricole de Tiripétio (Michoacan, Mexique ; Angiano Valencia, 2010) et une série de visages (source amleft.blogspot.com).

Chacune de ces deux images présente de petites surfaces continues et des discontinuités franches. On retrouve des éléments de similarités : chaque champs est à la fois différent et semblable à son voisin, chaque visage est à la fois différent et semblable à son voisin.

Selon l'approche mécanistique, on pourrait associer ces deux images à des sous bassins versants élémentaires au sein desquels les processus hydro-sédimentaires doivent être bien définis sur chaque parcelle (visage) avant d'envisager l'emboîtement d'échelle. Pour la figure de droite, l'extension de la « zone géographique » d'étude à 1500 visages (soit 40 fois plus de parcelles) constitue une difficulté logistique importante qui nécessiterait à minima l'instrumentation et le suivi de toutes les parcelles simultanément. En réalité, l'extension de la zone d'étude à 1500 visages vient lisser des singularités de petites échelles et fait ressortir d'autres éléments de formes (fig.E.3.4.). Ce type d'analogie souligne le fait que certaines discontinuités peuvent être très importantes à une échelle donnée (les traits des visages, les yeux, la bouche) et devenir un élément intrinsèque de l'objet à une autre échelle.

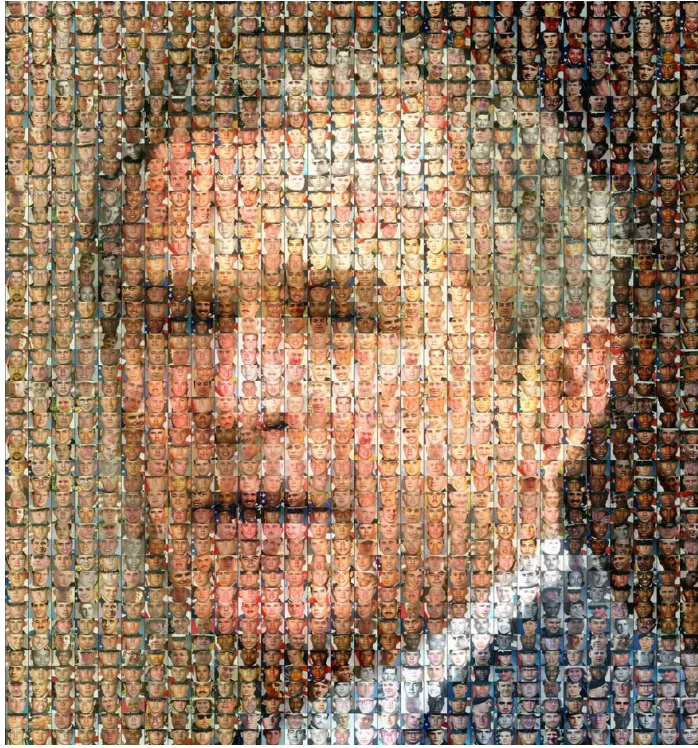


Fig. E.3.4. .Mosaic of the photos of American service men and women. <http://amleft.blogspot.com/>

Analogie rhéologique

D'une certaine manière, la rhéologie offre un cadre scientifique qui permet de formaliser la notion d'échelle d'hétérogénéité illustrée sur la fig. E.3.4.

La rhéologie est la science de l'écoulement (du grec *rheo*, couler et *logos*, étude). Fondamentalement, l'objectif de la rhéologie consiste à extraire des lois de comportements macroscopiques simples entre la déformation d'un corps et les contraintes de surfaces conduisant à cette déformation.

L'utilisation de la rhéologie est adaptée aux milieux continus, c'est-à-dire que les essais doivent être réalisés dans des conditions pour lesquelles les hétérogénéités spatiales de l'objet sont suffisamment petites pour considérer l'objet homogène et continu. L'illustration la plus démonstrative de l'intérêt de la rhéologie en dynamique des fluides est probablement liée à l'estimation de la viscosité cinématique. Dans le cas d'un fluide newtonien (telle que l'eau, le miel et les sédiments cohésifs, dans les situations les moins contraignantes), des interactions complexes et à priori désordonnées se produisent à l'échelle brownienne entre les particules (environ 10^{-9} m). A grande échelle (micrométrique ou plus) un fluide newtonien a un comportement continu tel que sa déformation se fera à vitesse constante pour une contrainte de cisaillement constante (Fig. E.3.5., newtonian conventional). Cet exemple montre que la compréhension d'un système complexe à une échelle donnée peut être simplifiée à plus grande échelle, si tant est que cette échelle est exempte d'hétérogénéités. L'exemple des visages illustre bien un transfert depuis une échelle spatiale pour laquelle les hétérogénéités étaient importantes (fig.E.3.3b) à une échelle pour laquelle elles contribuent dans leur ensemble à l'objet final (figure E.3.4).

Dans les années à venir, je souhaiterais me rapprocher de spécialistes de la modélisation mathématique des hétérogénéités du paysage afin de mieux cerner ce qui, dans l'étude d'un système complexe tel qu'un bassin versant, relève de l'erreur intrinsèque de mesure, vis-à-vis de ce qui relève de la variabilité temporelle et de l'hétérogénéité spatiale (Gaucherel, 2009). Ce type de réflexion pourrait à terme orienter les choix de modélisation des systèmes complexes, probablement autour d'une voie intermédiaire entre l'approche statistique et l'approche déterministe.

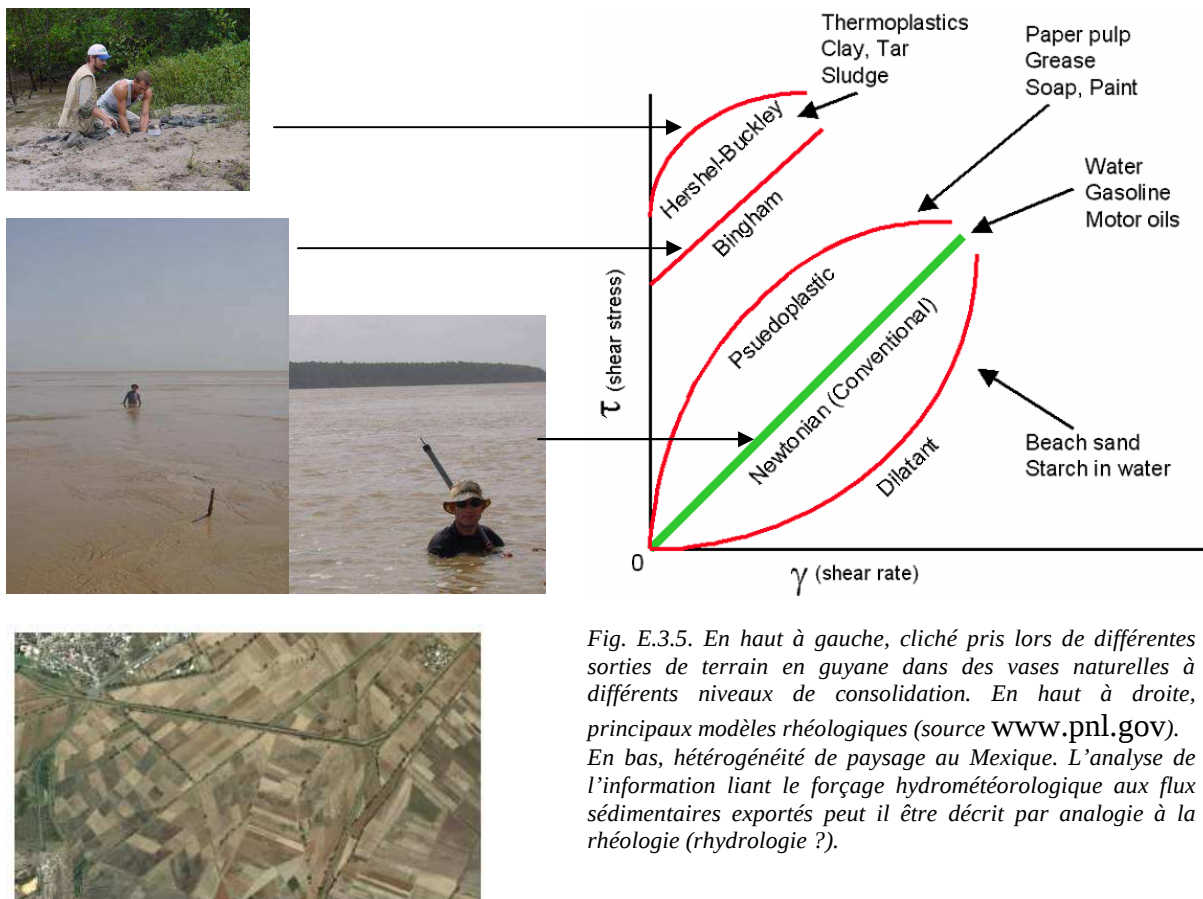


Fig. E.3.5. En haut à gauche, cliché pris lors de différentes sorties de terrain en guyane dans des vases naturelles à différents niveaux de consolidation. En haut à droite, principaux modèles rhéologiques (source www.pnl.gov). En bas, hétérogénéité de paysage au Mexique. L'analyse de l'information liant le forçage hydrométéorologique aux flux sédimentaires exportés peut il être décrit par analogie à la rhéologie (rhydrologie ?).

F. Remerciements

Plus de dix années passées à s'intéresser à la dynamique des sédiments cohésifs et son impact sur les écosystèmes. Autant de moments partagés avec des collègues (devenus amis), des étudiants, des techniciens, des administratifs ; bref, avec un ensemble de personnes qui ont fait de ces dix années une tranche de vie formidablement riche.

A l'heure des remerciements, je souhaiterais être exhaustifs et n'oublier personnes, merci donc à tous, qu'ils soient, en Guyane, au Mexique ou ailleurs. Merci plus spécifiquement : aux membres du jury pour leurs appréciations et les conseils suite à ce document et à la soutenance, sandrine anquetin, georges vachaud, alain crave, sylvain ouillon, jean loup guyot, ian droppo, robert lafite. Merci à mes amis devenus collègues ou mes collègues devenus amis ainsi qu'aux rencontres fortuites : cyril, peggy, fred, manolo, perrette, les amis de la réunion, laurent, simon, véro, monbenoit, hervé, éric, matthieu, jean marc, daniel auchère, andrew manning, stéphane guyonic, han winterwerp, susana vinzon, keith dyer, erik toorman, ankie bruens, gween lintern, lucas merckelbach, antoine gardel, christophe proisy, les touloulous, jerome fiot, edward anthony, jp lefevre, daniel guiral, laurent polidori, jean pierre lamoureux, alain bellandouz, charles vignard, john wells, francois fromard, ricardo silva jacinto, bob aller, nicolas baghdadi, carlos oliveiros, laurent kelle, benoit de thoisy, franck dolique, odette machado, tesy prost, ashish mehta, thierry aubry, pierre lehir, aldo sottolichio, david hurther, patrice bretel, gillian sills, christian prat, paoloa, anne sophie susperregui, michel esteves, guillaume nord, wajdi, patrick, thierry, jean, jean paul, cédrick, julien, clément, thomas, thomas, philippe, oldrich, théo, thierry, marc, alex, michel, hervé, jean françois, félipe, manuel, erna, eduardo, gerardo, ken, fatima, el compadre, rocio, jennifer, dorothée, lila, florence, marc, jordan, loic, clément, brice, la css1, spécialement gaston et bruno, les gardes cna, sebastien, camille, hervé, tanguy, la famille de huertita, reynaldo, reyna, les compères de potrerillos, jorge schondube, odette, claire, mouloud, meulette, les crapauds et tous les autres.... et évidemment merci à dad, mum, floutch, hanaé, lila.

G. Bibliographie citée

- Abril G., F. Guérin, S. Richard, et al. (2005), Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana), *Global Biogeochem.Cycles*, 19, GB4007.
- Aller, J.Y., Aller, R.C., Kemp, P.F., Chistoserdov, A.Y. and Madrid, V.M. 2010. Fluidized muds : a novel setting for the generation of biosphere diversity through geologic time. *Geobiology*, 8, 169-178.
- Allison, M.A., Nittrouer, C.A. and Kineke, G.C. 1995. Seasonal sediment storage on mudflats adjacent to the Amazon River. *Marine Geology*, 125, 303-328.
- Allison, M.A., Lee, M.T., Ogston, A.S., Aller, R.C. 2000. Origin of Amazon mudbanks along the northeastern coast of South America. *Marine Geology*, 163, 241-256.
- Anguiano Valencia, J.R. 2010. Informe del monitoreo pluviografico de la cuenca de Cointzio. Reporte de licenciatura para el I.R.D. 33 pages.
- Augustinus, P.G.E.F., 2004. The influence of the trade winds on the coastal development of the Guianas at various scale levels: a synthesis. *Mar. Geol.*, 208, 141-151.
- Baghdadi, N., Gratiot, N., Oliveros, C., Lefebvre, J.-P., Bourguignon, A. 2004. Coastline and mudbank monitoring in French Guiana Contributions of radar and optical satellite imagery. *Canadian J.Remote Sensing*. 30 No2, 109-122.
- Baghdadi, N. and Oliveros, C. 2007. Potential of ASAR/Envisat data for mud bank monitoring in French Guiana compared to ASTER imagery. *Journal of Coastal Res.* 23-6, 1509-1517.
- Baltzer F., Allison M. and Fromard F., 2004 (éditeurs invités) - The coast of the Guianas and other mangrove fringed coastal zones, Special Issue, *Marine Geology*.
- Barbier et al., 2008. Coastal ecosystem based management with non linear ecological functions and values. *Science*, 319(321).
- Beven, K. and Freer, J. 2001. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 249, 11-29.
- Blake, W.H., Droppo, I.G., Humphreys, G.S., Doerr, S.H., Shakesby, R.A. and Wallbrink, P.J. 2007. Structural characteristics and behaviour of fire-modified soil aggregates. *Journal of geophysical research*, 112, F02020.
- Bonnet, M.P. and Wessen, K., 2001. ELMO, a 3-D water quality model for nutrients and chlorophyll: first application on a lacustrine ecosystem. 141, 19-33.
- Borga, M., Gaume, E., Creutin, J.D. and Marchi, L. 2008. Surveying flash floods : gauging the ungauged extremes. *Hydrological processes*, 22, 3883-3885.
- Borrero, J. C. 2005. Field data and satellite imagery of tsunami effects in Banda Aceh. *Science* 308, 1596-1596.
- Brasington J. and Richards K., 2000. Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills. *Hydrological Processes* 14: 2559-2574.
- Camenen, B. 2007. Settling velocity of sediments at high concentrations, Intercoh conference, Saga, Japan, Sept. 2005, in "Sediment and Ecohydraulics 9", T.Kusuda, H.Yamanishi, J.Spearman, and J.Z.Gailani (Eds),chap. 15, pp. 211-226, 2007.
- Camenen, B. 2005. State of the art on the settling velocity of sediments particles in suspension, rapport interne, non publié.
- Chapman, T. 1999. A comparison of algorithms for streamflow recession and baseflow separation, *Hydrological processes*, 13, 701-714.
- Camp, T.R. et Stein, P.C., 1943. Velocity gradients and internal work in fluid motion. *Journal of Boston Society of Civil engineers*, 219-237.

- Coyne A., Schafer J., Hurtrez J.E., Dumas J., Etcheber H. and Blanc G., 2004. Sampling frequency and accuracy of SPM flux estimates in two contrasted drainage basins, *Science of the Total Environment*, 330: 233-247.
- Clark S.E. and Siu C.Y.S., 2008. Measuring solids concentration in stormwater runoff: comparison of analytical methods. *Environ. Sci. Technol.* 42, 511–516.
- Crave, A. 2006. Modélisation expérimentale de la dynamique des reliefs. Mémoire d'Habilitation à Diriger de Recherches. Univ. De Rennes 1.
- Crave, A and Davy, P. 2001. A stochastic “precipiton” model for simulating erosion/sedimentation dynamics. *Computer and geosciences*. 27, 815-827.
- Crookston, N. L.: Custom Climate Data Requests, in: *Climate Estimates, Climate Change and Plant Climate Relationships*, <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/>, Moscow Forestry Sciences Laboratory, Rocky Mountain Research Station, USDA Forest service, Visited 15 December 2008.
- Dai, S.B., Lu, X.X., Yang, S.L., Cai, A.M., 2008. A preliminary estimate of human and natural contributions to the decline in sediment flux from the Yangtze river to the east china sea. *Quaternary international*, 186 (2008) 43-54.
- Day, W.H. and Giosan, L., 2008. Survive or subside. *Nature Geoscience*, 1(3), 156.
- De Croutte, E., Gallissaires, J.M. and Hamm, L., 1996. Flume measurements of mud processes over a flat bottom under steady and unsteady currents. Report n°R3. Sogréah Ingénierie.
- Diaz, R.J. and Rosenberg, R. 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321:926.
- Dixon, T. H. et al. 2006. Subsidence and flooding in New Orleans. *Nature* 441, 587-588.
- Downing J., 2006. Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly. *Continental Shelf Research*. 26: 2299–2318.
- Droppo, I.G.; Nackaerts, K.; Walling, D.E.; and Williams, N. 2005. Can flocs and water stable soil aggregates be differentiated within fluvial systems? *Catena*, 60 (1), 1-18.
- Duvert, C., Gratiot, N., Evrard, O., Navratil, O., Némery, J., Prat, C. and Esteves, M. Drivers of erosion and suspended sediment transport in three contrasted headwater catchments. *Geomorphology*, in press.
- Dyer et al., 1989. Sediment processes in estuaries: future research requirements. *J. of Geoph. Res.*, 94, 14327-14339.
- Eisma, D., Augustinus, P.G.E.F., Alexander, C., 1991. Recent and subrecent changes in the dispersal of Amazon mud. *Netherlands Journal of Sea Research* 28, 181-192.
- Ericson, J. P., Vorosmarty, C. J., Dingman, S. L., Ward, L. G. & Meybeck, M. 2006. Effective sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications. *Global and Planetary Change* 50, 63-82.
- Evrard, O., Némery, J., Gratiot, N., Duvert, C., Ayrault, S., Lefèvre, I., Poulenard, J., Prat, C., Bonté, P. and Esteves, M., Sediment dynamics during the rainy season in tropical highland catchments of central Mexico using fallout radionuclides. Submitted to *Geomorphology*.
- Escoufier, B., 1979. Traitement simultané de variables quantitatives et qualitatives en analyse factorielle. *Les cahiers de l'analyse des données* 4 (2), 137-146.
- European ISO EN Rule 748, 1997. Measurement of liquid flow in open channels – velocity-area methods, Reference number ISO 748:1997 (E), International Standard, 41, 42, 43, 44, 45, 46.
- Feates, N.G., Hall, J.R., Mitchener, H.J. and Roberts, W. 1999. COSINUS Field Experiment, Tamar Estuary. Measurement of properties of suspended sediment flocs and bed properties. Report TR82. HR Wallingford.
- Fennessy, M.J., Dyer, K.R. and Huntley, D.A., 1994. INSSEV: an instrument to measure the size and settling velocity of clogs in situ. *Marine Geology*, 117, 107-117.
- Furukawa, K., 1997. Currents and sediment transport in mangrove forests. *Estuarine coastal and shelf science*. 44 : 301-310.

- Fennessy, M.J., Dyer, K.R. and Huntley, D.A. 1994. INSSEV: An instrument to measure the size and settling velocity of flocs in situ. *Marine Geology*, 117, 107-117.
- Fiot, J., and Gratiot, N. 2006. Structural effects of tidal exposures on mudflats along the French Guiana coast (N.E. South America). *Experimental and field approaches. Marine Geology*. 228, 25-37.
- Foster I.D.L., Millington R. and Grew R.G., 1992. The impact of particle size controls on stream turbidity measurements; Some implications for suspended sediment yield estimation, in *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*, edited by J. Bogen, D. E. Walling, and T. J. Day, IAHS Publ. 210: 51-62.
- Froidefond, J.M., Pujos, M., Andre, X., 1988. Migration of mudbanks and changing coastline in F. Guiana. *Mar. Geol.* 84, 19– 30.
- Froidefond, J.M., Lahet, F., Hu, C., Doxaran, D., Guiral, D., Prost, M.T., Ternon, J-F. 2004. Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana. *Marine Geology*, 208. 153-168.
- Furukawa, K., Wolanski, E., Mueller, H., 1997. Currents and sediment transport in mangrove forests. *Estuarine, coastal and shelf science*, 44, 301-310.
- Gardel, A. et Gratiot, N. 2004. Dynamique littorale et impacts socio-économiques en Guyane française Approche par télédétection spatiale. Restitution finale, consultance N° 02/CNES/0814/00. Juin 2004. 54p.
- Gardel, A. and Gratiot, N., 2005. A satellite image-based method for estimating rates of mud bank migration, French Guiana, South America. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 720-728.
- Gardel, A. and Gratiot, N., 2006. Monitoring of coastal dynamics in French Guiana from 16 years of SPOT satellite images,. *J.Coastal Res SI (39)*. 1503-1506.
- Gardel A., Morelle F., Proisy C., Anthony E.J. and Gratiot N. 2007. Recent results on hydro-sedimentary and ecological processes that govern the coastal dynamics of French Guiana. *Proceedings, 8th International Ecolab Workshop on Amazon Ecosystems*, august 6-12 2007, Macapá, Brazil, pp 55-58.
- Gaucherel, C. 2009. Self similar land cover heterogeneity of temperate and tropical landscapes. *Ecological complexity*. 6, 346-352.
- Gautheron A. 1994. Incertitudes sur la mesure des Matières en Suspension en Basse Durance. EDF DTG, Technical Report, Grenoble, 50 p.
- Gnacadjia, L., 2008. Desertification and Climate Change, the undeniable link. Invited talk of the United Nations Convention to Combat Desertification. September 2008, Guadalajara, Mexico.
- Gray J.R., Glysson G.D., Turcios L.M., and Schwarz G.E., 2000. Comparability of Suspended-Sediment Concentration and Total Suspended Solids Data, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4191, 14 p.
- Gratiot, J., Gratiot, N., de Thoisy, B. 2004. Evolution de la distribution des pontes de tortues marines sur l'île de Cayenne (Guyane française) lors de la migration d'un banc de vase. 7th International Ecolab Workshop on Amazon Ecosystems, Cayenne, Guyane, December 2004.
- Gratiot, N. 2000. Etude expérimentale des couches de crèmes de vases turbulentes. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble. 210p.
- Gratiot, N., Mory, M. and Auchère, D. 2000. An acoustic Doppler velocimeter (ADV) for the characterisation of turbulence in concentrated fluid mud. *Continental shelf research*, 20
- Gratiot, N. and Manning, A.J 2004. An experimental investigation of floc's characteristics in a diffusive turbulent flow. *J.Coastal Res., SI(41)*, 105-113.
- Gratiot, N., Gardel, A. and Polidori, L. 2005. Remote sensing based bathymetry on the highly dynamic Amazonian coast. 9th International Coastal Symposium, 5-8 june 2005. Hofn, Iceland, CD Rom, 13p.

- Gratiot, N., Gratiot, J., de Thoisy, B., Kelle, L. 2006. Estimation of marine turtles nesting from incomplete data ; statistical adjustment of a sinusoidal function. *Animal Conservation*. 9, 95-102.
- Gratiot, N., Gardel, A. and Anthony, E.J., 2007. Trade-wind waves and mud dynamics on the French Guiana coast, South America: input from ERA-40 wave data and field investigations. *Marine Geology*. 236, 15-26.
- Gratiot, N. and Manning, A.J., 2008. Chapitre 5. Flocculation processes in concentrated benthic suspension layer (CBS) using a laboratory diffusive turbulent grid tank. In: T. Kudusa, H. Yamanishi, J. Spearman and J.Z. Gailani, (eds.), *Sediment and Ecohydraulics - Proc. in Marine Science, INTERCOH 2005*, Amsterdam: Elsevier, Volume 9, 2008, pp 53-67.
- Gratiot, N., Anthony, E., Gardel, A., Gaucherel, C., Proisy, C. and Wells, J.T.. 2008. Significant contribution of the 18.6 year tidal cycle to regional coastal changes. *Nature Geoscience*. 1, 169-172.
- Gratiot, N., Duvert, C., Collet, L., Vinson, D., Némery, J., Saenz-Romero, C. 2010. Increase in surface runoff in the central mountains of Mexico: lessons from the past and predictive scenario for the next century. *HESS* (14) 2, 291-300.
- Gratiot, N. and Anthony, E.J. In prep. Structuration of the coast of Guyana's : interaction between physical, biological and human induced processes.
- Gray J.R., and Gartner J.W., 2009. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring, *Water Resour. Res.*, 45, W00D29, doi:10.1029/2008WR007063.
- Guérin F. and G. Abril (2007), Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir. *J. Geophys. Res. (Biogeosciences)* 112, G03006.
- Guyot, J.L., Filizola, N. et Laraque, A. 2005. Régime et bilan du flux sédimentaire de l'Amazonie à Obidos. *Sediment Budgets 1* Book Series: IAHS publication, 291. 347-354.
- Horowitz A. J., Rinella F. A., Lamothe P., Miller T. L., Edwards T. K., Roche R. L., and Rickert D. A., 1989. Cross-sectional variability in suspended sediment and associated trace element concentrations in selected rivers in the U.S. In: (eds. Hadley, R. F., and Ongley, E. D.), *Sediment and the Environment*, IAHS Publication 184: 57 - 66.
- Horowitz A.J., Elrick K.A., von Guerard P.B., Young N.O., Buell G.R. and Miller, T.L., 1992. The use of automatically collected point samples to estimate suspended sediment and associated trace element concentrations for determining annual mass transport. In: (eds. Bogen, J. Walling, D. Day, T.), *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*, Proceedings of the IAHS symposium, Oslo, Norway, 1992, IAHS Publication 210: 209 - 218.
- Horowitz A.J., 2008. Determining Annual Suspended Sediment and Sediment-Associated Trace Element and Nutrient Fluxes. *The Science of the Total Environment*, 400: 315 – 343.
- Houdant, B. 2004. Contribution à l'amélioration de la prévision hydro-météorologique opérationnelle. Pour l'usage des probabilités dans la communication entre acteurs. Thèse de doctorat ENGREF, 209 pages.
- Joannis C., Ruban G., Aumond G., Bertrand-Krajewski J.L., Battaglia P., Lacour C., Saad M. and Chebbo G., 2010. Implementation of turbidity sensors in sewer systems, *Techniques - Sciences - Méthodes*, 1-2: 21-35.
- Jouon, A., Ouillon, S., Douillet, P., Lefebvre, J.P., Fernander, J.M., Mari, X., Froidefond, J.M. 2008. Spatio-temporal variability in suspended particulate matter concentration and the role of aggregation on size distribution in a coral reef lagoon. *Marine geology*, 256, 36-48.
- Julien PY. 1998. *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Kelle,L, Gratiot, N., and Benoît de Thoisy (2009). Olive ridley turtle *Lepidochelys olivacea* in French Guiana: back from the brink of regional extirpation?. *Oryx*, 43 , pp 243-246
- Kirkby, M.J., Jones, R.J.A., Invine, B., Gobin, A., Govers, G., Cerdan, O., Van Rompaey, A.J.P., Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., King, D., Montanarella, L., grimm, M., Vieillefont, V., Puigdefabregas, J., Boer, M., Kosmas, C., Yassoglou, N., Tsara, M., Mantel, S., Van Lynden, G.J. and Huting, J. 2004. Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The

- PESERA Map. Explanation of Special Publication Ispra 2004 No.73. European Soil Bureau Research Report No.16.EUR 211176, 18pp.
- Kranenburg, C. 1999. Effects of floc strength on viscosity and deposition of cohesive sediment suspensions. *Continental Shelf Research*, 19, 1665-1680.
- Kynch, G. J. 1952, "A theory of sedimentation" *Trans Faraday Soc.*, 48, 166-176.
- Lacour C., Joannis C. and Chebbo G., 2009. Assessment of annual pollutant loads in combined sewers from continuous turbidity measurements: Sensitivity to calibration data. *Water Research*, 43: 2179–2190.
- Laimé, M., 2007. Le Rhône pollué par les PCB : un Tchernobyl français. *Carnet d'eau, Le blog du Monde diplomatique*, 14 août 2007 (<http://blog.mondediplo.net/2007-08-14-Le-Rhone-pollue-par-les-PCB-un-Tchernobyl>).
- Lefebvre, J.-P., Dolique, F. and Gratiot, N. 2004. Geomorphic evolution of a coastal mudflat under oceanic influences: an example from the dynamic shoreline of French Guiana. *Marine Geology*. 208: 191-205.
- Lewis J. and Eads R., 2008. Implementation guide for turbidity threshold sampling: principles, procedures, and analysis. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-212. Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 86 p.
- Lopez-Granados, E., Gratiot, N., Mendoza, M.E., González, D.I., Arnaud, F., Magand, O., Prat, C. and Esteves, M. 2006. Analysing some relationships between land cover, land use change and hydrological processes at watershed level; a multitemporal study in the Cointzio watershed, Mexico. In prep.
- Maggi, F., Manning, A.J. and Winterwerp, H. 2006. Image separation and geometric characterisation of mud flocs. *J. of Hydrology*, 326, 325-348.
- Martinez, J.M., Guyot, J.L., Filizola, N. and Sondag, F. 2009. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data.
- Matisoff, G., Wilson, C. G., Whiting, P. J., 2005. The $^{7}\text{Be}/^{210}\text{Pb}$ ratio as an indicator of suspended sediment age or fraction new sediment in suspension. *Earth Surface Processes & Landforms* 30, 1191-1201.
- Michallet, H. and Mory, M. 2004. Modelling of sediment suspensions in oscillating grid turbulence. *Fluid dynamics research*, 35, 87-106.
- Migniot, C., 1968. Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. *La Houille Blanche*, 7, 591-620.
- Moatar F, Person G., Meybeck M., Coynel A., Etcheber H. and Crouzet P., 2006. The influence of contrasting suspended particulate matter transport regimes on the bias and precision of flux estimates. *Science of the Total Environment*, 370(2-3): 515- 531.
- McDowell, D.N. and O'Connor, B.A. 1977. Hydraulic behaviour of estuaries. London:Mac-Millan.
- Michallet H., Mory M., 2004. Modelling sediment suspensions in oscillating grid turbulence. *Fluid Dynamics Research* 35, 87-106.
- Mikkelsen, O.A. and Pejrup, M. 2001. The use of a LISST-100 laser particle sizer for in-situ estimates of floc size, density and settling velocity. *Geo-Marine letters*, 20, 187-195.
- Mikkelsen, O.A., Hill, P.S., Milligan, T.G., Chant, R.J., 2005. In situ particle size distributions and volume concentrations from a LISST-100 laser particle sizer and a digital floc camera. *Cont. Shelf Res.* 25, 1959– 1978.
- Nathan, R.J. and McMahon, T.A. 1990. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses, *Water resource research*, 26, 7, 1465-1473.
- Navratil, O., Esteves, M., Legout, C., Gratiot, N., Willmore, S, Némery, J., and Grangeon., T. Scaling suspended sediment monitoring uncertainties in a highly erodible mountainous catchment. To be submitted.
- Némery, J., Alvarado, R., Gratiot, N., Duvert, C., Mahé, F., Duwig, C., Bonnet, MP., Prat, C., Esteves, M. 2009. Biogeochemical characterization of the Cointzio reservoir (Morelia,

- Mexico) and identification of a watershed-dependent cycling of nutrients. AGU fall meeting, 14-18 Dec. San Francisco.
- Némery, J., Alvarado, R., Gratiot, N., Duvert, C., Mahé, F., Duwig, C., Bonnet, MP., Prat, C., Esteves, M. 2009. Biogeochemical characterization of the Cointzio reservoir (Morelia, Mexico) and identification of a watershed-dependent cycling of nutrients. AGU fall meeting, 14-18 Dec. San Francisco.
- Nord, G. and Esteves, M. 2005. PSEM_2D: A physically based model of erosion processes at the plot scale. *Water resources research*, 41, W08407.
- Nord, G. and Esteves, M. 2005. Evaluation of sediment transport formulae and detachment parameters in eroding rills using PSEM_2D and the Water Erosion Prediction Project (WEPP) database. *Water resources research*, 43, W08420.
- Orwin J.F. and Smart C.C., 2004. Short-term spatial and temporal patterns of suspended sediment transfer in pro-glacial channels, Small River Glacier, Canada. *Hydrological Processes*. 18: 1521– 1542.
- Pagès, J., 2004. Analyse factorielle de données mixtes. *Rev. Statistique Appliquée* 52 (4), 93–111.
- Pfannkuche J. and Schmidt A., 2003. Determination of suspended particulate matter concentration from turbidity measurements: particle size effects and calibration procedures, *Hydrol. Process*. 17: 1951–1963.
- Phillips, J.M. and Walling, D.E., 1995. An assessment of the effects of sample collection, storage and resuspension on the representativeness of measurements of the effective particle size distribution of fluvial suspended sediment. 1995. *Water research*, 29 (11), 2498-2508.
- Phillips J.M., Webb B.W., Walling D.E. and Leeks G.J.L., 1999. Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. *Hydrological Processes* 13: 1035–1050.
- Pilkey, O. H. & Cooper, J. A. G. 2004. Society and sea level rise. *Science* 303, 1781-1782 .
- Poulenard, J., Perrette, Y., Banget, B., Quetin, P., Trevisan, D., Dorioz, J.M. 2009. Infrared spectroscopy tracing of sediment sources in a small rural watershed (French Alps). *Science of the total environment*. 409, 2808-2919.
- Proisy, C., Gratiot, N., Anthony, E. J. Gardel, A., Fromard, F., Heuret, P., 2009. "Mud bank colonization by opportunistic mangroves: a case study from French Guiana using lidar data". *Continental Shelf Research*, 29, 632-641.
- Prosser, I.P., and Rustomji, P. 2000. Sediment transport capacity for overland flow. *Progress in Physical Geography* 24, 179–193.
- Quinton, J.N., Govers, G., Van Oost, K. and Bardgett, R.D. 2010. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Nature Geoscience*. 3, 311-314.
- UNEP-WMCM, 2006. In the front line: shoreline protection and other ecosystem services from mangroves and coral reefs. UNEP-WMCM, Cambridge, UK 33pp.
- Riley S.J., 1998. The sediment concentration-turbidity relation: its value in monitoring at Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia. *Catena* 32: 1-14.
- Rodriguez, H.N., Mehta, A.J., 1998. Considerations on wave-induced fluid mud streaming at open coasts. In: Black, K.S., Paterson, D.M., Cramp, A. (Eds.), *Sedimentary Processes in the Intertidal Zone*. Spec. Publ. Geol. Soc. London, vol. 139, pp. 177–186.
- Saenz -Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St- Amant, R., Beaulieu, J., and Richardson, B. A. in press. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation, *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-009-9753-5, 2010.
- Sauer V.B. and Meyer R.W., 1992. Determination of error individual discharge measurements, U.S. Geol. Surv. Open-File Rpt., 92-14.
- Servat, E. et le conseil scientifique de l'IRD. 2010. Contribution du conseil scientifique de l'I.R.D. à la réflexion stratégique. Juin 2010, 35pages.
- Simon, B., 2007. La Marée océanique côtière. Edité par l'Institut Océanographique.

- Simpson, G and Castelltort, S. 2006. Coupled omde of surface ware flow, sediment transport and morphological evolution. *Computer and geosciences*. 32, 1600-1614.
- Steegeen A. and Govers G. 2001. Correction factors for estimating suspended sediment export from loess catchments. *Earth Surf. Process. Landforms*. 26: 441–449.
- Sottolichio, A., Hurther, D., Gratiot, N., Bretel, P. Acoustic measurements of turbulence in highly turbid waters of a macrotidal estuary.. Submitted to *Continental Shelf Research*
- Syvitski, J.P.M., Kettner, A.J., Overeem, I., Hutton, E.W.H., Hannon, M.T., Brakendridge, H.G.R., Day, J., Vorosmarty, C.J., Saito, Y., Giosan, L. and Nicholls, R.J. 2009. Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, 2, 681.
- Syvitski, J. P. M., Vorosmarty, C. J., Kettner, A. J. & Green, P. 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308, 376-380.
- Susperregui, A.S., Gratiot, N., Esteves, M. and Prat, C. 2009. A preliminary hydrosedimentary view of a highly turbid, tropical, manmade lake: Cointzio Reservoir (Michoacán, Mexico). *Lakes & Reservoirs : Res & Management* (14), 31-39.
- Vörösmarty, J.V., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., Syvitski, J.P.M. 2003. Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, n° 39 (1-2), p. 169-190.
- Wells, J.T., Coleman, J.M., 1981. Periodic mudflat progradation, northeastern coast of South America: a hypothesis. *J. Sediment. Petrol.* 51 (4), 1069–1075.
- Winterwerp, J.C., 2001. Stratification effects by cohesive and noncohesive sediment. *Journal of geophysical research*. 106, C10, 22559-22574.
- Winterwerp, J.C. 2002. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. *Continental Shelf Res.* 22, 1339–1360.
- Winterwerp, J.C., de Graaff, R.F., Groeneweg, J., Luijendijk, A.P. 2007. Modelling of wave damping at Guyana mud coast. *Coastal Engineering*, 54, 249-261.
- Winterwerp, J.C., Borst, W.G. and de Vries, M.B. 2005. Pilot studyon the erosion an drehabilitation of a mangrove mud coast. *Journal of Coastal Research*, 21-2, 223-230.
- Williams, G.P., 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *J. Hydrol.* 111, 89–106.
- Williams, N.D., Walling, D.E. and Leeks, G.J.L. 2007. High temporal resolution in situ measurement of the effective particle size characteristics of fluvial suspended sediment. *Water research*, 41, 1081-1093.
- Williams, N.D., Walling, D.E. and Leeks, G.J.L. 2008. An analysis of the factors contributing to the settling potential of fine fluvial sediment. *Hydrological processes*. 22, 4153-4162.
- Wren D.G., Barkdoll B.D., Kuhnle R.A. and Derrow R.W., 2000. Field techniques for suspended sediment measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(2): 97–104.
- Yesiller, N., Miller, C.J., Inci, G., Yaldo, K., 2000. Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils. *Eng. Geol.* 57, 105–121.
- Yang, S.L., Zhang, J. and Xu, X.J., 2007. Influence of the Three gorges dam on downstream delivery of sediment and its environmental implications, Yangtze river. *Geophysical research letters*, 34, L10401.
- Zhang, K. Q., Douglas, B. C. & Leatherman, S. P. 2004. Global warming and coastal erosion. *Climatic Change* 64, 41-58.