

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Agence Nationale de la Recherche
ANR



EFREM



CENTRE EUROPÉEN DE RECHERCHE ET D'ENVIRONNEMENT
DE GÉOSCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

Ifremer



EXTREMA Colloque de restitution finale Compilation des actes du colloque

Cadarache, 4-5 mai 2011

Episodes météo-climatiques extrêmes et redistribution des masses
sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier

Programme Vulnérabilité : milieux et climat 2006 de l'ANR
Contrat N° ANR-06-VULN-005 (janvier 2007-juin 2011)

Rapport DEI/SESURE n° 2011-24

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'INTERVENTION
Service d'étude et de surveillance de la radioactivité dans
l'environnement

Demandeur	Agence Nationale de Recherche
Référence de la demande	Contrat ANR -06-VULN-005 - Actes du colloque de restitution finale
Numéro de la fiche programme	EXTREMA - 15000126/0010
Processus de rattachement	R4

EXTREMA
Colloque de restitution finale
Compilation des actes du colloque

Cadarache, 4-5 mai 2011

Épisodes météo-climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier

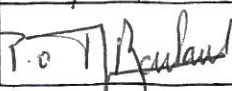
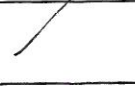
Programme Vulnérabilité : milieux et climat 2006 de l'ANR

Contrat N° ANR-06-VULN-005

Frédérique Eyrolle

Laboratoire d'Études Radioécologiques en milieux Continental et Marin

DEI/SESURE/2011-24

	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur	Chef du SESURE	Directeur de la DEI	Directeur Général de l'IRSN *
Noms	F. EYROLLE	P. RENAUD	N. CHAPTAL J-M. PERES GRADON	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	05/07/2011	3/10/2011	17/10/11	19/10/11	
Signatures					

DIFFUSION : Libre ☒ Interne ☐ Limitée ☐

LISTE DES PARTICIPANTS (PAR ORGANISMES PUIS PAR ORDRE ALPHABÉTIQUE)

Nom	Organisme
Aubert Dominique	CEFREM - coordination CEFREM - UMR 5110
Bassetti Maria Angela	CEFREM
Berné Serge	CEFREM
Buscail Roseline	CEFREM
Carbonne Jacques	CEFREM
Dumas Cloé	CEFREM
Durieu de Madron Xavier	CEFREM
Fanget Anne Sophie	CEFREM
Geuneugues Audrey	CEFREM
Heussner Serge	CEFREM
Jeanty Gérard	CEFREM
Ludwig Wolfgang	CEFREM
Sotin Christine	CEFREM
Stabholz Marion	CEFREM
Sabatier François	CEREGE - coordination CEREGE - UMR 6635
Dufour Simon	CEREGE
Noack Yves	CEREGE
Provansal Mireille	CEREGE
Raccasi Guillaume	CEREGE
Radakovitch Olivier	CEREGE
Vella Claude	CEREGE
Cadiou Jean François	IFREMER - coordination IFREMER - centre de Toulon
Castelle Sabine	IFREMER - centre de Toulon
Cossa Daniel	IFREMER - centre de Toulon
Dennielou Bernard	IFREMER - centre de Brest
Gonzalez Jean Louis	IFREMER - centre de Toulon
Jouet Gwenaél	IFREMER - centre de Brest
Khripounoff Alexis	IFREMER - centre de Brest
Levêque Jean Pierre	IFREMER - centre de Toulon
Sauzade Didier	IFREMER - centre de Toulon
Estournel Claude	Observatoire Midi-Pyrénées LA - coordination LA - UMR 5560
Auger Pierre-Amaël	Observatoire Midi-Pyrénées LA
Hermann Marine	Observatoire Midi-Pyrénées LA
Marsaleix Patrick	Observatoire Midi-Pyrénées LA
Eyrolle Frédérique	IRSN/DEI/SESURE/LERCM - coord. IRSN - coord. projet
Antonelli Christelle	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
Arnaud Mireille	IRSN/DEI/SESURE/LERCM

Boullier Vincent	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
Boyer Patrick	IRSN/DEI/SECRE/LME
Champelovier Alain	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
Charmasson Sabine	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
Dimeglio Yves	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
Dufois François	IRSN/DEI/SESURE/LERCM - Thèse
Ferrand Emmanuelle	IRSN/DEI/SESURE/LERCM - Post doc
Giner Sabrina	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
Gurriaran Rodolfo	IRSN/DEI/STEME/LMRE
Marion Cédric	IRSN/DEI/SESURE/LERCM - Thèse
Masson Olivier	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
Paulat Pascal	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
Piga Damien	IRSN/DEI/SESURE/LERCM - Thèse
Querre Philippe	IRSN/DPAM/SEMIC
Saey Lionel	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
Thébault Hervé	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
Megninta Abdramane	ENI-ABT (Bamako)
Anselmet Fabien	IRPHE - UMR 6594
Amielh Muriel	IRPHE - UMR 6594
Maillet Grégoire	Université d'Angers, BIAF

Sommaire

1 Contexte	7
2 Liste des présentations du colloque - Programme	8
3 Résumés des présentations	10
3.1 Évolution des débits liquides et solides des fleuves côtiers du Golfe du Lion	10
3.2 Flux solides du Rhône et flux de radioactivité – poids des évènements	10
3.3 Comportement des éléments en traces métalliques dans les eaux du Rhône et de la Têt. Importance des conditions hydrologiques	12
3.4 Estimation de la vitesse de déplacement de la charge de fond par suivi topographique sur le Grand Rhône – vers une réévaluation des flux solides en transit ?	12
3.5 Variations du rivage à l'embouchure du Rhône durant les événements extrêmes	13
3.6 Instrumentation au débouché du Rhône et enregistrements sédimentaires – Impacts des crues et des tempêtes sur la mobilité contemporaine du prodelta rhodanien	13
3.7 Impact des crues sur la couverture sédimentaire de surface à l'interface Rhône/littoral	14
3.8 Enregistrements récents de différents types de dépôts de crues du Rhône : prodelta à 45 m - année 2008	15
3.9 Évaluation du rôle d'événements météorologiques violents sur la contamination chimique des masses d'eau : développement d'un Système de Fond, Régional, Autonome, de Mesure et d'Échantillonnage (Station FRAME)	15
3.10 Apports et transferts en mercure au Golfe du Lion - Apports en mercure par le Rhône : comparaison des années 1994-95 et 2009-10 et chronologie de l'accumulation dans le pro-delta	16
3.11 Chronostratigraphie et processus d'édification du lobe moderne du delta du Rhône : Bras de Fer/Roustan/Pégoulie	17
3.12 Poussières sahariennes (fréquence, tendance historique, contribution aux flux, spatialisation latitudinale) – Feux de biomasse	18
3.13 Chronique de mercure et méthylmercure dans l'atmosphère et les dépôts atmosphériques à La Seyne-sur-Mer en 2009-10	18
3.14 Flux d'ETM et autres éléments - Poids des apports atmosphériques en milieu côtier – Poids des évènements	19
3.15 Bilan du suivi des concentrations et flux d'éléments traces métalliques (ETM) au Cap Béar	19
3.16 Impact de la convection sur les flux particuliers et la dynamique sédimentaire dans le bassin profond du Golfe du Lion	20
3.17 Le mercure et le plomb dans les sédiments du canyon du Cap de Créus	21

3.18 Impact des épisodes de formation d'eau dense sur la composition des sédiments marins profonds ? Étude de l'hétérogénéité spatiale par rapport à la variabilité temporelle	21
3.19 Variabilité spatiale des taux de sédimentation et du stockage des radionucléides artificiels dans les berges du Rhône aval	22
3.20 Resuspension des particules et éléments traces métalliques associés sur le prodelta du Rhône	22
3.21 Modélisation du transport de la matière particulaire et des éléments associés dans le Golfe du Lion - Importance des événements extrêmes (crues, tempêtes et cascading)	23
4 Références des travaux réalisés dans le cadre du projet EXTREMA (selon classification ANR)	25
4.1 Publications	25
4.1.1 Articles dans des revues à comité de lecture	25
4.1.2 Articles France	26
4.2 Communications	26
4.2.1 Communications internationales	26
4.2.2 Communications France	27
4.3 Articles de diffusion	27
4.3.1 Articles vulgarisation	27
4.3.2 Conférences vulgarisation	27
4.4 Ouvrages Chapitres d'ouvrages	27
4.5 Thèses soutenues, ou en cours	27
4.5.1 Financées par l'ANR	27
4.5.2 Non financées par l'ANR mais directement liées au programme	28
4.6 Post doctorants	28
4.6.1 Financés par l'ANR	28
4.7 Rapports	29

1 CONTEXTE

Le projet EXTREMA, réalisé sous l'égide de l'Agence nationale de la recherche dans le cadre du programme *Vulnérabilité : Milieux et Climat – 2006*, a débuté en janvier 2007 et s'est achevé en juin 2011. Plusieurs organismes y ont participé en tant que partenaires: l'IRSN, le CEFREM, le CEREGE, l'IFREMER et le Laboratoire d'Aérodynamique du Pôle d'Océanographie Côtière de l'Observatoire Midi-Pyrénées.

L'objectif du projet EXTREMA est d'évaluer les conséquences des épisodes météo-climatiques extrêmes sur la redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein du système côtier du Golfe du Lion. Il est structuré en 5 grands thèmes :

- A- le volet atmosphérique (précipitations, aérosols, poussières sahariennes) ;
- B- le volet fleuves (crues et inondations) ;
- C- le volet milieu marin côtier (crues, tempêtes) ;
- D- le milieu marin profond (coulée d'eau dense, convection) ;
- E- le volet modélisation.

Le projet est ciblé sur le Rhône aval et la Têt, le plateau continental du Golfe du Lion jusqu'aux canyons du milieu marin profond. Il s'intéresse au devenir des éléments traces potentiellement contaminants (ETPC) tels que les métaux lourds (Cu, Cd, Pb, Zn, Hg) et les radionucléides artificiels, dans le cadre du changement climatique et de la « pathologie » des événements extrêmes. EXTREMA repose en grande partie sur l'acquisition de données à partir d'observatoires et d'instrumentations déployés à l'échelle du Golfe du Lion par les différentes équipes partenaires, ainsi que sur la modélisation hydro sédimentaire appliquée aux différentes échelles spatio-temporelles : prodeltas/plateau continental - continu/événementiel. Les partenaires sont impliqués dans la plupart des thèmes, sur des actions propres en concertation avec les autres membres associés au thème afin de mettre en synergie les moyens et les compétences.

Les résultats du projet permettent de préciser :

1. les modifications de fréquence des épisodes météo climatiques de grande ampleur sur la zone côtière du Golfe du Lion en s'appuyant en particulier sur les chroniques historiques ;
2. les flux de masse et d'Éléments Traces Potentiellement Contaminants (ETPC) associés générés lors des événements extrêmes ;
3. la typologie des flux extrêmes en identifiant les vecteurs de transfert préférentiels ;
4. les réponses du système aux différents forçages (relations d'interpolation entre les forçages et les flux) ;
5. l'intensité spatio-temporelle des redistributions des masses ;
6. les milieux de concentration (focalisation) et les compartiments puits ;
7. la durée des déséquilibres, éventuellement les phénomènes de seuil et les changements abrupts potentiels ;
8. la vulnérabilité des environnements côtiers au changement global pour les 20 à 30 prochaines années sur la base de scénarii.

Les 4 et 5 mai 2011 a eu lieu, à Cadarache (13115), le colloque de restitution finale des travaux accomplis dans le cadre du projet EXTREMA par les différents partenaires. Le présent fascicule rassemble les résumés des contributions des participants à ce colloque ainsi que la synthèse des publications rattachées au projet.

2 LISTE DES PRESENTATIONS DU COLLOQUE - PROGRAMME

Introduction - Rappel des enjeux du projet et résultats marquants obtenus (Frédérique Eyrolle, IRSN coordination)

Évènements, stocks et flux rivières

- **Wolfgang Ludwig, Franck Lespinas (CEFREM):** Évolution des débits liquides et solides des fleuves côtiers du Golfe du Lion.
- **Christelle Antonelli, Frédérique Eyrolle, Vincent Boullier (IRSN) :** Flux solides du Rhône et flux de radioactivité - poids des événements.
- **Cloé Dumas, Dominique Aubert and co (CEFREM):** Comportement des éléments en traces métalliques dans les eaux du Rhône et de la Têt. Importance des conditions hydrologiques.
- **Guillaume Raccasi (CEREGE), François Sabatier (CEREGE), Frédérique Eyrolle (IRSN), Mireille Provansal (CEREGE):** Estimation de la vitesse de déplacement de la charge de fond par suivi topographique sur le Grand Rhône - vers une réévaluation des flux solides en transit ?

Évènements et Transferts milieu côtier - plateau

- **François Sabatier, Philippe Dussouillez, Doriane Delanghe-Sabatier, Boris Hanot (CEREGE):** Variations du rivage à l'embouchure du Rhône durant les événements extrêmes.
- **Jimmy Bertier, Mireille Arnaud, Sabine Charmasson (IRSN) :** Instrumentation au débouché du Rhône et enregistrements sédimentaires - Impact des crues et des tempêtes sur la mobilité contemporaine du prodelta rhodanien.
- **Grégoire Maillet (Université d'Angers), Claude Vella (CEREGE), Cédric Marion (IRSN), Grégory Agin (IFREMER), Thomas Abintou (IFREMER), Gwenaël Jouet (IFREMER) :** Impact des crues sur la couverture sédimentaire de surface à l'interface fleuve / littoral.
- **Roselyne Buscail (CEFREM), Nicolas Bossard, Anne sophie Fanget, Gérard Jeanty, Christine Sotin (CEFREM), Mireille Arnaud (IRSN), Serge Berné (CEFREM) :** Enregistrements récents de différents types de dépôts de crues du Rhône : prodelta -45m, année 2008.
- **Jean Louis Gonzales (IFREMER) and co :** Évaluation du rôle d'événements météorologiques violents sur la contamination chimique des masses d'eau : développement d'un Système de Fond, Régional, Autonome, de Mesure et d'Échantillonnage (Station FRAME).
- **Daniel Cossa (IFREMER), Sabine Castelle (IFREMER), Bernard Dennielou (IFREMER), Mireille Arnaud (IRSN), Dominique Aubert (CEFREM), Jean François Chiffolleau (IFREMER), Anne Sophie Fanget (IFREMER), Bernard Averty (IFREMER) :** Apports et transferts en mercure au Golfe du Lion - Apports en mercure par le Rhône : comparaison des années 1994-95 et 2009-10 et chronologie de l'accumulation dans le pro-delta.
- **Grégoire Maillet (Université d'Angers, BIAF), Anne-Sophie Fanget (CEFREM), Gwenaël Jouet (IFREMER-GM), Claude Vella (CEREGE), Mireille Arnaud (IRSN), Serge Berné (CEFREM), Bernard Dennielou (IFREMER-GM) et la RHOSOS Team :** Chronostratigraphie et processus d'édification du lobe moderne Bras de Fer/Roustan/Pégoulie.

Évènements et flux atmosphériques

- **Olivier Masson, Pascal Paulat, Damien Piga (IRSN)** : Poussières sahariennes (fréquence, tendance historique, contribution aux flux, spatialisation latitudinale) - Feux de biomasse.
- **Sabine Castelle (IFREMER), Daniel Cossa (IFREMER), Bernard Averty (IFREMER), Olivier Masson (IRSN)** : Chronique de mercure et méthylmercure dans l'atmosphère et les dépôts atmosphérique à La Seyne-sur-Mer en 2009-10.
- **Yves Noack (CEREGE), Dominique Aubert (CEFREM)** : Flux d'ETM et autres éléments - Poids des apports atmosphériques en milieu côtier - Poids des évènements.
- **Dominique Aubert, Nicole Delsaut, Christine Sotin, Audrey Geuneugues (CEFREM)** : Bilan du suivi des concentrations et flux d'éléments traces métalliques (ETM) au Cap Béar.

Transferts plateau - canyons

- **Xavier Durieu De Madron (CEFREM), Alexis Khripounoff (IFREMER), Dominique Aubert (CEFREM), Serge Heussner (CEFREM), N. Delsaut (CEFREM), P. Crassous (IFREMER), P. Puig (ICM-CSIC), Isabelle Taupier-Letage (LOBP), P. Testor (LOCEAN), A. Calafat (UB)** : Impact de la convection sur les flux particuliers et la dynamique sédimentaire dans le bassin profond du Golfe du Lion.
- **Daniel Cossa (IFREMER), Roselyne Buscail (CEFREM), Jean François Chiffolleau (IFREMER), Olivier Radakovich (CEREGE), Gérard Jeanty, Serge Heussner (CEFREM)**: Le mercure et le plomb dans les sédiments du canyon du Cap de Créus.
- **Marion Stabholz, Dominique Aubert, Xavier Durieu de Madron, Philippe Kerhervé, Christine Sotin, Gérard Jeanty, Roselyne Buscail, Serge Heussner (CEFREM)** : Impact des épisodes de formation d'eau dense sur la composition des sédiments marins profonds? Étude de l'hétérogénéité spatiale par rapport à la variabilité temporelle.
- **Mireille Provansal (CEREGE), Emmanuelle Ferrand (IRSN), Frédérique Eyrolle (IRSN), Guillaume Raccasi (CEREGE), Rodolfo Gurriaran (IRSN), Alain Champelovier (IRSN), Pascal Paulat (IRSN)** : Variabilité spatiale des taux de sédimentation et du stockage des radionucléides artificiels dans les berges du Rhône aval.

Modélisation

- **Olivier Radakovitch (CEREGE), Patrick Boyer (IRSN), Valérie Devallois (IRSN), Murielle Amiel (IRPHE), Fabien Anselmet (IRPHE), Abdramane Megninta (ENI-ABT, Bamako)**: Resuspension des particules et éléments traces métalliques associés sur le prodelta du Rhône.
- **Claude Estournel, Caroline Ulses, Patrick Marsaleix (POC- LA)** : Modélisation du transport de la matière particulaire et des éléments associés dans le Golfe du Lion. Importance des événements extrêmes (crues, tempêtes et cascading).

3 RESUMES DES PRESENTATIONS

3.1 Évolution des débits liquides et solides des fleuves côtiers du Golfe du Lion

Wolfgang Ludwig et Franck Lespinas

En région méditerranéenne, les apports fluviaux sont dominés par l'occurrence de crues violentes à durée très courte. Le contraste entre ces crues et les longues périodes d'étiage est particulièrement marqué dans le cas des nombreux fleuves côtiers qui caractérisent le bassin versant de la Méditerranée. Même si leurs apports à la zone côtière semblent faibles, en comparaison de ceux de grands fleuves comme le Rhône, ils peuvent apporter, localement, des quantités importantes de matière à court terme. Une meilleure compréhension du rôle de ces apports pour la dynamique hydro-sédimentaire du Golfe du Lion était donc l'une des questions à laquelle il fallait répondre dans Extrema.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'évolution des flux d'eau dans les principaux fleuves côtiers du Golfe du Lion (Tech, Têt, Agly, Aude, Orb et Hérault). Ce travail a pu mettre en évidence une diminution significative des débits annuels dans de nombreux bassins depuis les années 1960 et identifier les mécanismes climatiques et hydrologiques à l'origine de ces tendances. Dans l'ensemble, la réduction des débits correspond à une diminution de la ressource en eau de 20% environ pour la période 1965-2004. Comme les précipitations n'ont pas changé, cette diminution semble directement liée au réchauffement que la région a connu depuis le début des années 1980. Ce dernier a été particulièrement marqué en période printanière et estivale et s'explique par une extension spatio-temporelle des hautes pressions subtropicales. La diminution des couverts neigeux dans les bassins d'altitude et la baisse des apports souterrains dans les bassins de plaine semblent être à l'origine de la baisse des débits. Les débits du Rhône, par contre, sont restés stationnaires. Certaines tendances à la baisse dans la partie méditerranéenne de son bassin versant semblent compensées par une hausse des débits en amont.

Dans un deuxième temps, nous avons également tenté une reconstitution des apports sédimentaires au Golfe du Lion par les fleuves. Ce travail de synthèse pouvait s'appuyer sur certaines études au sujet des relations débits - concentrations en matières en suspension qui ont été réalisées dans le cadre des programmes de recherche antérieurs, comme celui de la Zone Atelier ORME. Les résultats indiquent également une légère tendance à la diminution des apports sédimentaires par les fleuves côtiers en comparaison avec les apports du Rhône, mais témoignent surtout de la très grande variabilité interannuelle des apports par les fleuves côtiers. Durant des années humides et « riches » en crues, les principaux fleuves côtiers peuvent apporter la même quantité de sédiments que le Rhône (p. ex. 1972). Pendant des années sèches, leur contribution aux apports totaux peut tomber en dessous de 1% (p. ex. 1998). La moyenne à long terme se quantifie à 13% environ, ce qui laisse penser que les sédiments du plateau devraient être dominés par le Rhône. Néanmoins, comme les crues des fleuves côtiers sont fréquemment associées avec des tempêtes dans la zone côtière, peu favorable à la préservation des apports fluviaux devant leurs embouchures, leur devenir en mer pourrait donc être sensiblement différent de celui des sédiments du Rhône.

3.2 Flux solides du Rhône et flux de radioactivité - poids des événements

Christelle Antonelli, Frédérique Eyrolle et Vincent Boullier

Entre 2006 et 2010, les flux de matières en suspension et de radionucléides transportés par le Rhône ont été mesurés à pas de temps mensuel par la Station Observatoire du Rhône en Arles. Ces observations haute fréquence avaient pour objectif de déterminer les concentrations en matières en suspension et les concentrations en radionucléides transportés par voie dissoute et particulaire ; de déterminer d'éventuelles variations à l'échelle inter ou intra-annuelle et de préciser l'impact des événements extrêmes sur les flux de masse et de contaminants associés.

La période étudiée se caractérise par une faiblesse des apports liquides et solides. Entre 2006 et 2010, le flux moyen de MES est estimé à environ 4.10^6 tonnes pour un débit liquide moyen de $1\,500\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. C'est plus de 2 fois moins que la moyenne calculé par les précédents travaux au cours des 40 dernières années.

Dans le détail, seule l'année 2008 est marquée par plusieurs crues avec une fréquence de retour supérieure à l'année. On retient notamment l'événement de mai 2008, qui a permis d'enregistrer des teneurs en matières en suspension élevées (de l'ordre de 4 g par litre au paroxysme de la crue) en comparaison de l'hydrologie. Cette différence est en partie liée à l'origine de cet événement, qualifié de crue semi-anthropique. En effet, l'événement hydrologique enregistré sur la Durance a été concomitant de lâchers de barrage sur la Durance elle-même ainsi que sur l'Isère et ses affluents alpins. Ces observations permettent de souligner l'importance de l'observation de terrain puisque les couples débit liquide/MES obtenus à cette occasion s'éloignent très sensiblement de la relation théorique établie en Arles sur la période 2002-2010.

Les flux de radionucléides artificiels présents en phase dissoute ou particulaire et calculés sur la même période permettent de préciser que :

- les flux de radioactivité en phase dissoute sont prépondérants en termes d'export à la Méditerranée (en liaison avec le volume total d'eau exporté par le fleuve),
- en période de crue, les concentrations des radionucléides artificiels mesurés dans cette phase dissoute sont identiques à ceux mesurés hors période de crue. Cette confirmation permet de simplifier le suivi des événements de crue pour la phase dissoute, les flux étant uniquement contrôlés par les variations du débit liquide,
- les teneurs en radionucléides artificiels mesurés en crue sont en revanche modifiées par rapport aux teneurs mesurées hors événements. Ces modifications résultent de trois facteurs principaux que sont l'arrêt des rejets par les industriels à partir de débits fixés par arrêté, des apports du bassin versant par érosion et ruissellement des sols anciennement marqués par les retombées globales des tirs d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl, des remobilisations sédimentaires dans le chenal même du fleuve.

L'ensemble de ces mesures a permis d'établir des bilans de masse et de radioactivité pour les années 2006 à 2010. Ces bilans ont été mis en parallèle des rejets de radioactivité réalisés par les industriels présents dans le corridor rhodanien pour l'année 2008 et le seront prochainement pour les années 2006 à 2009 (pour 2010, rejets des industriels non parus à la date de finalisation d'Extrema). Ils permettent de montrer que les radionucléides issus des seuls rejets industriels actuels présentent un transfert rapide vers le milieu marin. Pour les radionucléides présentant diverses origines (rejets actuels et anciens, retombées globales sur le bassin versant), les transferts sont différés, expliquant les excédents observés en Arles.

De manière générale, les crues ayant affectées le Rhône entre 2006 et 2010, participent de manière relativement importante au transfert de cette radioactivité particulaire, favorisant jusqu'à près de 50% du transfert annuel. On retiendra néanmoins que ces événements, peu nombreux sur la période d'étude, peuvent engendrer jusqu'à 90% du flux de matières annuellement exportées vers le milieu marin. De fait, il conviendrait de poursuivre l'observation haute fréquence afin de déterminer s'il en va de même pour les radionucléides, notamment en raison de la remise en jeu de sédiments par des actions anthropiques (lâchers de barrages, dragages) qui tendent à modifier les relations empiriques précédemment établies.

3.3 Comportement des éléments en traces métalliques dans les eaux du Rhône et de la Têt.

Importance des conditions hydrologiques

Chloé Dumas, Dominique Aubert, Wolfgang Ludwig, Christine Sotin, Audrey Gueneugues, Jacques Carbonne, Philippe Kerhervé et François Bourrin

Un suivi mensuel des concentrations et des flux en ETM dans les matières en suspension (MES) est réalisé depuis 2006 sur le Rhône et 5 autres fleuves côtiers méditerranéens (Hérault, Orb, Aude, Agly et Têt) se jetant dans le Golfe du Lion. Les stations de prélèvements instrumentées et automatisées implantées à la proche embouchure du Rhône et de la Têt permettent en outre de caractériser plus finement, à pas de temps plus resserré, les événements de crue majeurs sur ces 2 fleuves. Ceci nous permet d'appréhender à la fois la variabilité saisonnière et l'influence des conditions hydrologiques sur la composition chimique des particules exportées vers la Méditerranée.

Les concentrations moyennes en ETM enregistrées dans les MES de la Têt au cours du suivi mensuel sont dans des gammes très proches de celles mesurées pour les MES du Rhône (par exemple Cu : 59 et 52 $\mu\text{g.g}^{-1}$; Zn : 218 et 250 $\mu\text{g.g}^{-1}$; respectivement). Quelques teneurs semblent tout de même significativement plus faibles sur la Têt que dans le Rhône (Ni : 24 et 48 $\mu\text{g.g}^{-1}$; Pb : 41 et 69 $\mu\text{g.g}^{-1}$; respectivement). Les concentrations en ETM relevées dans les particules du Rhône au cours de notre suivi sont également très proches de celles déterminées par Ollivier (2006) pour la période 2001-2002. Les facteurs d'enrichissement (EF) montrent en outre que les MES ne sont que très faiblement impactées par les activités humaines. Seul Cd et Zn, et Pb et Cu sur la Têt présentent des EF significativement >2 .

Sur la Têt, lors des épisodes de crue étudiés, l'initiation de la crue est systématiquement caractérisée par des MES concentrées en ETM dont l'origine anthropique est marquée (Pb, Cu). Puis ces concentrations chutent très rapidement avec la hausse rapide des débits. Ceci peut s'expliquer par la concentration relativement importante des teneurs en matière organique, phase porteuse de nombreux ETM, suite au lessivage des horizons superficiels des sols. Par la suite, l'essentiel du matériel transporté est minéral et issu de l'érosion des sols plus profonds, moins concentrés en ETM. Ceci est confirmé par la diminution des EF de Cu, Pb, Zn et Cd au cours de la crue attestant d'une origine de plus en plus « naturelle » pour ces éléments au fil du temps.

Dans le cas du Rhône, la typologie des crues peut être très différente d'un épisode à l'autre. Les événements étudiés ont montré que les épisodes cévenols ne se démarquaient pas fondamentalement des caractéristiques chimiques observées lors du suivi mensuel. A l'inverse, l'événement atypique de mai 2008 (contribution des bassins versants de la Durance et de l'Isère), plus chargé en MES qu'à la normale à débit équivalent, s'est caractérisé par une signature chimique singulière, à savoir des concentrations en ETM très inférieures aux teneurs relevées lors du suivi mensuel et des crues cévenoles. Aussi, pour l'année 2008, les flux d'ETM particuliers estimés à partir des moyennes du suivi mensuel sont largement surestimés (+ 50% pour Zn et Pb, + 30% pour Cu et Cd, +15% pour Ni...) par rapport à une estimation plus fine prenant en compte les caractéristiques chimiques des différents épisodes de crue et en particulier celui de mai 2008 qui a été le pourvoyeur essentiel de MES au cours de l'année.

Bibliographie : Ollivier (2006) - Géochimie du Rhône (flux et bilan d'érosion) et transfert d'eaux souterraines en Camargue (apports des isotopes du radium). Thèse de doctorat. Université Aix-Marseille III, 246 p.

3.4 Estimation de la vitesse de déplacement de la charge de fond par suivi topographique sur le Grand Rhône - vers une réévaluation des flux solides en transit ?

Guillaume Raccasi, François Sabatier, Frédérique Eyrolle et Mireille Provansal

The quantification of sediment transport by tracking the displacement of the bedload based on bathymetric surveys, combined with measurements of suspended matter flux is investigated in the lower Rhône River. The sand dunes heights range from 0.15 to 1.35 m and the displacement of these dunes is estimated at 190 m per annum. The

bathymetric surveys allow us to quantify and reveal the importance of resuspension by erosion of the bottom, a process that contributes sandy material to the suspended load. This process supplies 42% of the suspended matter input. The temporal resolution of measurements shows that these sedimentary inputs from the channel bed to the suspended matter flux are effective at discharges greater than $3\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. While the results obtained in this study are probably over-estimated compared to real fluxes, they remain of innovative value.

3.5 Variations du rivage à l'embouchure du Rhône durant les événements extrêmes

François Sabatier, Philippe Dussouillez, Doriane Delanghe-Sabatier, Boris Hanot

Dans le cadre de l'ANR Extrema nous avons numérisé toutes les données de sondes de la flèche de la Gracieuse, géoréférencé toutes les photographies aériennes existantes et intégré des images SPOT récentes afin de retracer l'historique de la construction de cet édifice sableux depuis la fermeture du Grau de Pégoulie (1892).

La diminution séculaire des apports sédimentaires du Rhône est confirmée, mais nous insistons surtout sur l'évolution morphologique des fonds qui conditionne aussi (surtout?) la redistribution longshore des sables aux plages limitrophes. Afin d'approfondir ce thème, le modèle 2DV NMLONG est utilisé. Nous montrons le rôle déterminant de la vitesse d'écoulement du courant fluvial, lui-même contrôlé par la morphologie de l'embouchure, sur la vitesse de la dérive littorale et donc la redistribution des sables vers la plage à proximité de l'embouchure. Autrement dit, les vitesses d'écoulement des crues à l'embouchure augmentant significativement depuis 50 ans, la dérive littorale est de moins en moins capable d'alimenter les plages. Ce processus, jamais investigué vient évidemment en ajout à ceux déjà connus comme la réduction historique des apports solides fluviaux.

Enfin, les variations rapides du rivage ont été mesurées avant/après chaque tempête durant 1 année complète. Nous mettons en évidence 3 zones. A proximité de l'embouchure et en bout de flèche où les transits longshores apparaissent préférentiellement. Dans la partie centrale, les variations épisodiques du trait de côte semblent plutôt marquées par des processus cross-shore.

3.6 Instrumentation au débouché du Rhône et enregistrements sédimentaires - Impacts des crues et des tempêtes sur la mobilité contemporaine du prodelta rhodanien

Jimmy Bertier, Mireille Arnaud, Sabine Charmasson

Pour étudier l'évolution de divers paramètres au niveau du prodelta rhodanien, une bouée (bouée Roustan Est) a été instrumentée afin d'obtenir des données en temps réel. L'IRSN participe à ce projet avec le déploiement d'un courantmètre houlographe A.D.C.P, positionné au pied de la bouée à une profondeur de 20m. L'appareil enregistre des données de houle, de courant sur une grande partie de la colonne d'eau. De plus, l'utilisation du mode backscatter permet d'obtenir un indice de rétrodiffusion avec lequel il est possible de déterminer la turbidité sur la colonne d'eau après calibration à l'aide de données de turbidité ponctuelle. Lors des différentes périodes de mesures, un altimètre acoustique Altus a été positionné à proximité du courantmètre pour enregistrer les variations d'altitude des sédiments au niveau du fond. L'acquisition des données météorologiques et de débits du Rhône vient compléter l'ensemble des données disponibles pour mieux comprendre l'impact des événements extrêmes sur l'évolution et la dynamique du prodelta.

Les résultats antérieurs (campagnes CARMA) et récents (campagne EXTREMA de 2010-2011) ont permis de mieux comprendre l'impact des crues sur les apports sédimentaires et celui des tempêtes sur la remise en suspension des sédiments et sur leur transport. Lors des périodes de crues l'apport de sédiments mesuré par l'altimètre au niveau du prodelta rhodanien peut atteindre environ 20 cm (en fonction de la crue et de son origine), il permet un dépôt variant de 4 à 6 cm en général sur le prodelta. Les élévations plus importantes ont lieu lors d'une crue assez marquée

succédant à une longue période d'étiage associé à une période calme suivant la crue favorisant le dépôt des sédiments. L'analyse du signal de rétrodiffusion du courantomètre montre aussi la présence de matière en suspension sur toute la colonne d'eau lors des épisodes de crues.

Les tempêtes, au niveau du delta du Rhône, susceptibles d'engendrer des houles de 2,5 à 3 m (hauteurs significatives) capables de remobiliser les sédiments sur le fond sont liées à deux vents dominants le mistral venant du nord et dans un second temps les vents du secteur sud-est. Les vents forts de mistral (20 m.s^{-1}) ont peu d'influence sur le plan d'eau au niveau de la zone de mesure, le fetch y est trop limité pour que des houles importantes se forment. Les vents forts de sud-est (à partir de 12 m.s^{-1}) permettent la formation de houles plus marquées venant du large (de 5 à 6 m au large et 2,5 à 3 m au niveau de la bouée), qui agissent sur la remise en suspension des sédiments. Ces vents font aussi apparaître des courants plus intenses sur une grande partie de la colonne d'eau ($0,2 \text{ m.s}^{-1}$ par temps calme et $0,6 \text{ m.s}^{-1}$ en période de tempête pour la cellule de mesure la plus basse) qui suivent les lignes isobathes vers le sud-ouest, entraînant un transport latéral des sédiments le long des pentes du prodelta.

3.7 Impact des crues sur la couverture sédimentaire de surface à l'interface Rhône/littoral

Grégoire Maillet, Claude Vella, Cédric Marion, Grégory Agin, Thomas Abintou, Gwenaél Jouet

En conditions extrêmes (crue, tempête) les embouchures sont des zones difficiles à instrumenter pour réaliser des mesures in-situ. Les méthodes utilisées pour estimer leur impact sur le substrat sédimentaire sont donc principalement indirectes. Dans le cadre de l'ANR EXTREMA, nous avons mis en œuvre un suivi diachronique des évolutions bathymétriques, la caractérisation de l'architecture et de la nature des corps sédimentaires de surface ainsi qu'une évaluation de l'impact des événements de crue sur la couverture sédimentaire de surface.

Cette étude a généré les résultats suivants :

L'analyse morphobathymétrique diachronique de la zone d'embouchure, effectuée au sondeur multifaisceaux, montre une résolution et une extension spatiale compatibles avec un suivi de la migration des dunes fluviales provoquée par un événement de crue. Ce suivi est le préambule à une tentative d'identification des micro-morphologies significatives en termes de dynamiques fluviales, et un préalable à la quantification de la charge de fond du fleuve ainsi qu'aux volumes de sable réellement exportés en mer par une crue.

La caractérisation de la couverture sédimentaire de surface (variabilité spatiale) a été réalisée sur la base de 100 échantillons de surface prélevés à la benne Van Veen ou au carottier boîte d'interface selon une grille d'échantillonnage serrée (~500m) respectant la localisation des principaux corps sédimentaires (chenal, lobe actuel, lobe ancien). L'étude a également permis la mise en œuvre du système RoxAnn, logiciel de classification automatique de la nature des fonds (texture). Par le biais d'une analyse de la réverbération des échos du signal d'un sondeur monofaisceau, l'énergie réfléchie est transformée en indices de rugosité et de dureté, que l'on peut associer à un type de fond grâce à une calibration par corrélation avec des prélèvements de surface ponctuels. Cette approche a généré 400 000 mesures qui ont permis la cartographie de la nature des fonds avec une résolution de 2,5 m.

L'impact des crues a été étudié par modélisation géostatistique (Grain Size Trend Analysis) de l'évolution des caractéristiques sédimentométriques (grain moyen, classement asymétrie) de la couverture sédimentaire. Cette approche a permis d'identifier et de localiser l'influence de 3 forçages principaux (courant fluvial, dérive littorale et déferlement) et a montré une permanence de l'influence de ces forçages en intensité et zone d'influence quel que soit le débit liquide du Rhône. L'étude a également confirmé la faiblesse des transferts sédimentaires du fleuve vers le littoral adjacent en période de crue ou d'étiage.

Sur la zone prodeltaïque, les dépôts de crue ont été parfaitement identifiés par l'analyse des séquences sédimentaires et des concentrations en ^{7}Be de carottes d'interface prélevées après les crues de mars et octobre 2008. L'étude

montre que ces dernières ont entraîné le dépôt de 34 à 43 cm de sédiments entre 20 m et 30 m de profondeur. Elle permet par interpolation de proposer un bilan sédimentaire qualitatif et quantitatif des transferts solides en période de crue (charge de fond et MES) et d'améliorer la compréhension de la variabilité des épaisseurs de dépôts en période de crue.

3.8 Enregistrements récents de différents types de dépôts de crues du Rhône : prodelta à 45 m - année 2008

Roselyne Buscail, Nicolas Bossard, Anne-Sophie Fanget, Gérard Jeanty, Marion Desmousseaux, Christine Sotin, Mireille Arnaud, Serge Berné

L'enregistrement sédimentaire de crues récentes du Rhône a été réalisé à partir de la crue exceptionnelle de juin 2008, remarquable en raison de l'importance de son apport en matières en suspensions (jusqu'à 3 g.l⁻¹). Une étude chronologique, par carottages les 8 juin, 6 septembre, 16 octobre et 4 décembre 2008, a été réalisée à 45 m de profondeur sur le prodelta, en face de l'embouchure du Rhône. Description lithologique, granulométrie, profils des teneurs en eau et porosité, des taux de Corg, Nt, C/N, carbonates ont permis de suivre l'évolution sur plusieurs mois (3, 4, 6 mois après la crue de juin) du dépôt de la crue initiale (32 cm), son enfouissement sous une crue peu importante de septembre ainsi que sous les crues automnales d'octobre et novembre.

Les différents faciès et les quantités de Corg qui caractérisent les dépôts à 45 m sous le panache du Rhône varient avec le type de crue du Rhône, c'est-à-dire en fonction :

- des débits liquides et solides ;
- du ou des sous-bassins versant concernés.

Trois types de dépôts de crue ont été identifiés :

- juin 1% Corg - médiane 12 µm - épaisseur 32 cm (crue du bassin de la Durance) ;
- septembre 1,6 % Corg - médiane 16 µm - épaisseur 4 cm ;
- octobre - novembre >2% (7%) Corg - médiane 12-75 µm - épaisseur 19 cm (crues cévenoles).

Bilan de l'enregistrement sédimentaire : Compaction, érosion et disparition totale d'un événement peu important sont en compétition, à 45 m de profondeur sur le prodelta du Rhône : après 3 mois, on observe une compaction de 8 cm du dépôt de la crue de juin, après 6 mois, celui-ci a diminué de 13 cm ; le nouveau dépôt de la crue de septembre observé dans la carotte du mois d'octobre n'est plus détectable dans l'enregistrement prélevé en décembre. L'épaisseur des dépôts érodés reste à préciser.

3.9 Évaluation du rôle d'événements météorologiques violents sur la contamination chimique des masses d'eau : développement d'un Système de Fond, Régional, Autonome, de Mesure et d'Échantillonnage (Station FRAME)

Jean Louis Gonzalez, J. Guyomarch, C. Podeur, P. Rousseaux, J. Legrand, J.M. Viane, R. Verney

En zone côtière, la colonne sédimentaire représente souvent l'un des stocks de contaminants chimiques les plus importants du milieu aquatique. Il est donc très important d'évaluer si ce stockage est pérenne et de mettre en évidence les processus qui pourraient être responsables d'une remise "à disposition" des contaminants dans la colonne d'eau, sous des formes beaucoup plus biodisponibles.

Dans les zones relativement peu profondes, les événements météorologiques (coups de vent, tempêtes, crues...) vont modifier localement l'hydrodynamique, en termes de vitesse de circulation et de turbulence au-dessus du sédiment. Ce

processus peut avoir beaucoup d'importance sur la dynamique des contaminants, l'érosion des sédiments conduisant à la libération des eaux interstitielles, ce qui va augmenter de façon notable les concentrations des contaminants sous forme dissoute dans la colonne d'eau, et remettre en suspension les particules les plus fines enrichies en contaminants.

Il semble donc important de pouvoir disposer d'outils permettant d'évaluer l'importance de ces processus et leur impact sur les écosystèmes.

La station benthique FRAME est un système autonome qui a été développé par l'IFREMER pour contribuer à l'évaluation de la contamination chimique (métaux traces et contaminants organiques) de la colonne d'eau, notamment lors des remises en suspension des sédiments associées à des événements météorologiques violents.

Cette station permet l'acquisition en continu des paramètres physiques du milieu (conductivité, température, pression, turbidité, vitesse et direction du courant, hauteur des vagues, taux d'érosion et de dépôt), de détecter l'événement météorologique et d'échantillonner in situ (extraction et concentration), suite à l'événement, des contaminants métalliques et organiques.

Le module d'échantillonnage des contaminants est basé sur l'utilisation d'échantillonneurs passifs (DGT: Diffusive Gradients in Thin films pour les métaux et SBSE (Stir Bar Sorptive Extraction) pour les contaminants organiques hydrophobes) qui ont été "marinés" et automatisés. Ces systèmes sont déclenchés lorsqu'un "événement" (fort courant associé à une remise en suspension) est détecté par le module de mesure des paramètres physiques.

L'ensemble de la station a été conçu pour être modulaire (ajout et retrait de différents capteurs) et pouvoir être mis en place et récupéré facilement à partir d'une embarcation légère. Son autonomie actuelle lui permet d'acquérir des données pendant une durée de l'ordre de 2 mois.

L'ANR EXTREMA, du fait de sa problématique, a contribué au développement de cet outil. La communication sera consacrée à la présentation du système utilisé et aux résultats obtenus lors des premiers tests.

3.10 Apports et transferts en mercure au Golfe du Lion - Apports en mercure par le Rhône : comparaison des années 1994-95 et 2009-10 et chronologie de l'accumulation dans le pro-delta

Daniel Cossa, Sabine Castelle, Bernard Dennielou, Mireille Arnaud, Dominique Aubert, Jean François Chiffolleau, Anne Sophie Fanget, Bernard Averty

Les concentrations en mercure total (Hg_T) et méthylmercure (MeHg) dissous et particulaires ont été mesurées à une fréquence bi-mensuelle dans les eaux du Rhône à Arles (Station SORA) de mars 2009 à mars 2010. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus lors d'une étude semblable effectuée en 1994-95. Par ailleurs, une carotte de sédiment prélevée dans le pro-delta a permis d'établir une chronologie des apports en mercure par le Rhône depuis le début de l'ère industrielle. En 2009-2011, les concentrations en Hg_T dissous ont varié de 0,08 à 1,85 ng/L, la fraction méthylée représentant de 1,5 à 28 % du Hg_T avec les plus forts pourcentages au printemps et en automne. Les concentrations en Hg_T particulaire ont varié de 0,07 à 0,43 mg/kg avec des fractions méthylées variant de 0,4 à 6,0 %. Ces concentrations sont environ deux fois plus faibles que celles mesurées dans le Rhône il y a 15 ans. L'étude de la carotte sédimentaire indique une augmentation des concentrations en mercure des particules déposées dans le pro-delta depuis le début de l'ère industrielle, puis une diminution dans les dernières décennies, parallèles à l'évolution de la consommation de charbon en France. Les concentrations en Hg_T ont culminé au début des années soixante, représentant 15 fois les concentrations pré-industrielles, alors qu'aujourd'hui elles sont encore 4 fois supérieures. L'analyse de particules en suspension recueillies à Arles pendant les crues de 2008 suggère une ou des sources de mercure en Cévennes.

3.11 Chronostratigraphie et processus d'édification du lobe moderne du delta du Rhône : Bras de Fer/Roustan/Pégoulie

Grégoire Maillet, Anne-Sophie Fanget, Gwenaél Jouet, Claude Vella, Mireille Arnaud, Serge Berné, Bernard Dennielou et la RHOSOS Team

L'ANR RHOSOS portée par IFREMER-GM, a pour objectif l'étude des changements environnementaux et climatiques enregistrés par les dépôts sédimentaires du Golfe du Lion depuis le dernier maximum glaciaire jusqu'à l'actuel. Ce projet se focalise sur les enregistrements sédimentaires caractéristiques des périodes de crise climatique (pulse) ayant généré des lobes deltaïques encore préservés sur la plateforme (Dernier Maximum Glaciaire, Younger Dryas, Petit Age Glaciaire...). Préalablement à la demande de financement de ce projet, des missions océanographiques ont été réalisées sur le lobe actuel du Rhône, notamment dans le cadre de l'ANR EXTREMA, afin de fournir des données contextuelles permettant de cibler au plus juste les objectifs et la méthodologie de la demande.

Ainsi, dans le cadre de l'ANR EXTREMA, notre travail a consisté à caractériser le lobe actuel du delta comme analogue de l'impact des événements extrêmes sur les dépôts prodeltaïques. La méthodologie a été basée sur la comparaison de données bathymétriques historiques avec des données acquises de stratigraphie sismique THR, et d'imagerie acoustique, ainsi que la caractérisation physique des dépôts sédimentaires par prélèvement de surface et carottages kullenberg (7 à 9 m de long avec mesures référencées dans le tableau n°1)

Etude	Objectif	Pas d'échantillonnage
XRF	Composition chimique	1 à 5 cm
Radio-éléments	Chrono-stratigraphie	5 cm
Ostracodes, forams	Caractérisation microfaune benthique	5 cm
Nannoplancton calcaire	Caractérisation microfaune pélagique	~30 cm
Carbone et contaminants organiques	Pollution organique	5 cm
Contaminants métalliques	Pollution minérale	2 cm

Tableau n° 1 : liste des études menées sur les carottes prélevées sur le lobe prodeltaïque du Rhône

Les premiers résultats montrent notamment que l'archivage sédimentaire des événements de crue dans les dépôts sédimentaires à l'embouchure du Rhône est correct à l'échelle séculaire. On note une bonne concordance des informations données par l'ensemble des proxies étudiés mais une mauvaise conservation temporelle de l'information puisqu'il a été difficile de remonter de manière précise au-delà de 100 ans. De ce fait la préservation des informations paléo-environnementales dans des paléo-lobes arasés de leur partie supérieure par l'action des houles reste conditionnée à la vitesse de remontée du niveau marin.

Les autres éléments mis en évidence par ce travail ont ainsi permis de :

- Définir les liens entre les caractéristiques des dépôts sédimentaires et les contraintes environnementales actuelles ou récentes ;
- Caractériser la variabilité spatio-temporelle de la couverture sédimentaire actuelle en lien avec les épisodes d'hydrologie fluviale extrême ;
- Contextualiser les informations contenues dans un lobe prodeltaïque en quantifiant l'évolution de la perturbation en fonction de l'ancienneté des dépôts.

Au final, l'ANR EXTREMA aura permis de caractériser la forte variabilité spatiale des dépôts sédimentaires à l'embouchure du Rhône, de constater que l'enregistrement des paramètres environnementaux se dégrade très rapidement lorsqu'on n'est pas à proximité immédiate du chenal fluvial ce qui a incité les porteurs du projet RHOSOS à intégrer des changements de résolution et/ou de marqueurs pour appréhender la continuité latérale des dépôts.

3.12 Poussières sahariennes (fréquence, tendance historique, contribution aux flux, spatialisation latitudinale) - Feux de biomasse

Olivier Masson, Pascal Paulat, Damien Piga

Les sols et la biomasse contiennent encore des traces de ^{137}Cs , radionucléide artificiel rejeté en grande quantité dans l'atmosphère lors des essais nucléaires et à la suite de l'accident de Tchernobyl. Ce traceur permet aujourd'hui de quantifier les mécanismes qui participent à sa rémanence dans l'atmosphère, à l'occasion d'épisodes plus ou moins extrêmes : soulèvement et transport de poussières désertiques, feux de biomasse.

La région saharienne est apparue comme l'une des régions privilégiées de remise en suspension du ^{137}Cs , caractérisée par le transport de grandes quantités de particules et une faible contribution aux augmentations de l'activité massique en ^{137}Cs , en relation avec les densités de dépôts observées dans cette région. Plusieurs moyens techniques complémentaires ont été utilisés pour détecter le passage des panaches de poussières sahariennes au niveau des stations OPERA. Une relation a ainsi pu être établie entre ces événements de transport de particules et les augmentations significatives des niveaux d'activité en ^{137}Cs . Enfin, le recensement d'un grand nombre d'événements significatifs a permis de quantifier l'export total en ^{137}Cs de ces événements, estimé entre 10^{11} et 10^{13} Bq par an. A l'échelle de la France, le dépôt annuel moyen associé à ces événements est inférieur à 1 Bq.m^{-2} , soit une contribution inférieure à 1 % des dépôts surfaciques antérieurs. Pour une station aux caractéristiques représentatives du réseau OPERA, ces événements contribueraient pour 30 % au bruit de fond ambiant en ^{137}Cs .

Les territoires fortement impactés par les retombées de l'accident de Tchernobyl ont été identifiés comme les principales zones de contribution permettant d'expliquer la rémanence atmosphérique du ^{137}Cs au niveau des stations OPERA. La caractérisation de l'épisode d'incendies de forêts en 2002 dans l'est de l'Europe a mis en évidence que ces événements peuvent être à l'origine d'un transport de particules porteuses de ce radionucléide sur de très grandes distances et entraîner des augmentations significatives des niveaux d'activité en ^{137}Cs à plusieurs milliers de kilomètres. Une estimation des quantités totales de ^{137}Cs remis en suspension à l'échelle de la saison sur l'ensemble des territoires présentant un marquage important en ^{137}Cs a été réalisée. Il est ainsi estimé qu'annuellement, de l'ordre de 10^{13} Bq de ^{137}Cs sont remis en suspension dans l'atmosphère par l'ensemble des incendies en Europe ainsi qu'en Fédération de Russie.

3.13 Chronique de mercure et méthylmercure dans l'atmosphère et les dépôts atmosphériques à La Seyne-sur-Mer en 2009-10

Sabine Castelle, Daniel Cossa, Bernard Averty, Olivier Masson

Les concentrations en mercure total (Hg_T) et méthylmercure (MeHg) dans le dépôt sec et humide ont été suivies au cours de la période avril 2009 à février 2010, respectivement sur une base hebdomadaire et événementielle. Parallèlement, la présence de mercure dans l'atmosphère a été quantifiée : aux quinze minutes en phase gazeuse et à la semaine dans l'aérosol. La concentration moyenne en mercure total dans la retombées humide a été de $6,2 \pm 4,3 \text{ ng/L}$, comportant une fraction méthylée d'environ 1 %. Les moyennes mensuelles des concentrations en mercure gazeux total ont varié de $0,8$ à $1,7 \text{ ng/m}^3$. Les concentrations présentent une variation cyclique diurne systématique vraisemblablement en liaison avec le cycle de photoxydo-réduction du mercure atmosphérique. L'amplitude de la variation est particulièrement marquée par vent Est et Sud-Est suggérant une influence du recyclage atmosphérique du mercure marin. Les valeurs les plus élevées en mercure gazeux (3 à 5 ng/m^3) ont été mesurées lors de périodes de vent de Nord-Ouest (Mistral). La moyenne des concentrations en Hg_T dans l'aérosol est de $0,03 \pm 0,01 \text{ ng/m}^3$ exprimée en volume d'air et de $1,38 \pm 0,6 \text{ mg/kg}$ exprimée en masse de matière. La richesse en mercure de l'aérosol est inversement proportionnelle avec l'abondance de particules atmosphériques ce qui suggère un processus

d'enlèvement. Le suivi atmosphérique initié dans le cadre d'EXTREMA sera poursuivi dans le cadre du projet européen GMOS jusqu'en 2015 afin d'estimer les tendances pluriannuelles.

3.14 Flux d'ETM et autres éléments - Poids des apports atmosphériques en milieu côtier - Poids des évènements

Yves Noack, Dominique Aubert

Des mesures de dépôt de particules (dépôt total ou dépôt sec/dépôt humide) ont été effectuées de novembre 2007 à juin 2009 sur trois sites de la région marseillaise (Port St Louis du Rhône, Ile du Frioul à Marseille, La Seyne-sur-Mer). Le flux moyen est de 1 g/m²/mois et peut atteindre 12 g/m²/mois lors des épisodes sahariens. Le dépôt humide représente environ 25 % du dépôt total sur l'ensemble de la période. Une douzaine d'éléments (Al, Ca, Fe, Mn, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn) ont été analysés pour les prélèvements effectués entre juin et décembre 2008. Hors épisodes sahariens, les flux d'Aluminium, de Fer, de Manganèse de Chrome et de Vanadium diminuent de Port St Louis à La Seyne, alors que ceux de Cuivre, Nickel et Plomb augmentent. Le flux de Calcium est nettement plus important sur l'Ile du Frioul. Zinc et Cadmium sont nettement les deux éléments les plus enrichis. Les éléments Al, Fe et Cr sont quasi exclusivement contenus dans la fraction particulaire alors que le Calcium est majoritairement contenu dans la fraction soluble. Le comportement des éléments (sec/humide, particulaire/soluble) varie suivant les sites, reflétant peut-être des sources différentes. Au Frioul, les métaux lourds sont essentiellement dans le dépôt humide alors qu'à La Seyne, le Plomb est plutôt dans le dépôt sec. Hormis pour Al, Ca, Fe et Cr, les fractions solubles des métaux sont plus importantes à Port St Louis et surtout à La Seyne qu'au Frioul. L'analyse de l'ensemble des prélèvements devrait amener l'utilisation de modèles récepteurs permettant la recherche des sources émettrices.

3.15 Bilan du suivi des concentrations et flux d'éléments traces métalliques (ETM) au Cap Béar

Dominique Aubert, Nicole Delsaut, Christine Sotin, Audrey Geuneugues

Un suivi à pas de temps mensuel des concentrations et des flux en ETM a été initié en juillet 2007 sur le site du Cap Béar, peu anthropisé au regard d'autres sites de la façade du Golfe du Lion étudiés dans le cadre de l'ANR EXTREMA. Le système de capteur passif (bidon surmonté d'un entonnoir), bien que rudimentaire, semble être représentatif des précipitations sur le site comme le montre la relation positive significative entre les volumes collectés par nos soins et les hauteurs d'eau mesurées à la station météorologique de Météo-France située à 700 m de notre dispositif. Les données chimiques obtenues concernent les dépôts totaux (dissous+particulaire) pour la période juillet 2007-août 2009. A partir de septembre 2009, les échantillons ont été filtrés afin de recueillir les données sur la fraction soluble des retombées atmosphériques. Les teneurs totales en ETM sont globalement plus importantes lorsque la masse de dépôt collectée est faible et à l'inverse diluées lorsque le dépôt est essentiellement sous forme dissoute. Les concentrations en éléments réputés terrigènes (Al et Sc) dans les échantillons totaux montrent une bonne corrélation tout au long du suivi. Fer, Ni, V, Cr, Mn, Ti, As montrent des relations linéaires significativement positives avec Al attestant d'une origine crustale pour ces éléments. Par ailleurs, les relations sont également significatives pour des métaux comme Pb, Cu, Cd et Zn soulignant le fait que la part anthropique de ces éléments est relativement limitée sur le site. Les flux calculés pour les éléments d'origine naturelle terrigène semblent liés à des « pulses » d'apports ayant probablement comme vecteur les poussières sahariennes (épisodes d'octobre 2007 et novembre 2008). Par contre pour Cd et Zn par exemple, les flux semblent déconnectés de ces épisodes. Les flux de cuivre quant à eux montrent une tendance saisonnière avec des apports plus marqués au printemps et en été que l'on peut expliquer par son utilisation locale intense pour les pratiques viticoles. Les flux déterminés sur la période 2007-2009 sont significativement plus faibles que ceux déterminés par Guieu et al. (2010) pour la période 2001-2002 sur le même site (x4 pour Zn et Cd, x3 pour Al, x2 pour Pb par exemple).

En ce qui concerne le dépôt soluble, les concentrations mesurées depuis août 2009 montrent des valeurs du même ordre que celles déterminées par Guieu et al. (1997) sur le littoral méditerranéen au début des années 1990 pour Ni, Cu et Zn mais par contre largement inférieures pour Al, Cd et Pb (3x, 5x et 20x moins, respectivement).

Bibliographie

Guieu et al. (1997): Atmospheric inputs of dissolved and particulate metals to the North Western Mediterranean. Deep Sea Research II: Topical Studies in Oceanography 44, 3-4, 655-674.

Guieu et al. (2010): Spatial variability of atmospheric fluxes of metals (Al, Fe, Cd, Zn and pb) and phosphorus over the whole Mediterranean from one-year monitoring experiment: biogeochemical implications. Marine Chemistry 120, 164-178.

3.16 Impact de la convection sur les flux particuliers et la dynamique sédimentaire dans le bassin profond du Golfe du Lion

Xavier Durrieu de Madron, Marion Stabholz, Serge Heussner, Nicole Delsaut, Alexis Khripounoff, Philippe Crassous, Antonio Calafat, Isabelle Taupier-Letage, Pierre Testor

Le Golfe du Lion en Méditerranée occidentale est une région régulièrement impactée par d'importants événements hydrodynamiques (cascading d'eau dense et convection au large) responsables du transport et de la redistribution d'importantes quantités de sédiments et de matière organique et contaminants associés. La variabilité des conditions hydrologiques (température, salinité), des courants et des flux particuliers a été suivie entre septembre 2007 et avril 2009 en différentes stations du bassin profond à partir de 5 lignes de mouillages instrumentées déployés entre 2050 m et 2400 m de profondeur.

Les résultats de la ligne centrale, équipée de capteurs CTD et courantomètres sur toute la colonne d'eau montrent clairement que la convection atteint la mi-hauteur d'eau (≈ 1000 m) pendant l'hiver 2008, et le fond (≈ 2400 m) pendant l'hiver 2009. Les courants horizontaux sont caractérisés par une très forte composante barotrope (homogénéité sur toute la colonne d'eau). Alors que l'intensité des courants moyen est de 5 cm/s, l'hiver et le printemps 2009 sont caractérisés par des courants plus forts jusqu'à 40 cm/s. Les courants verticaux, qui sont également significatifs pendant l'hiver 2009, confirment l'occurrence d'une convection jusqu'au fond.

Les résultats des différentes lignes à proximité du fond indiquent que les courants et les flux particuliers sont relativement cohérents et d'amplitudes similaires à l'échelle de la zone étudiée. L'analyse de la teneur en carbone organique particulaire indique de plus que les teneurs dans les pièges de fond, qui varient généralement entre 3 et 5%, sont anormalement faibles ($\leq 1\%$) pendant l'hiver 2009 et se rapprochent de celles observées dans les sédiments profonds superficiels ($\approx 0,8\%$).

Les profils de turbidité réalisés dans la région soulignent l'existence d'une couche turbide de fond, épaisse de plusieurs centaines de mètres, liée à la resuspension des sédiments de fond.

Toutes ces observations concordent pour montrer que les événements de convection profonde dans le Golfe du Lion provoquent une importante remobilisation des sédiments profonds. Ce phénomène est probablement très important pour la redistribution à l'échelle du bassin occidental de la Méditerranée du matériel particulaire et des éléments associés.

3.17 Le mercure et le plomb dans les sédiments du canyon du Cap de Créus

Daniel Cossa, Roselyne Buscail, Jean François Chiffolleau, Olivier Radakovich, Gérard Jeanty, Serge Heussner

Les concentrations en mercure (Hg) et en plomb (Pb) ont été déterminées dans deux carottes du Canyon du Cap de Créus prélevées par 1000 et 1400 m de profondeur. Après correction de l'effet de la granulométrie et de la présence de ptéropodites, les profils verticaux de Hg et d'isotopes stables du Pb (206 , 207 et ^{208}Pb), établis grâce à la datation au ^{210}Pb et au ^{137}Cs , font apparaître des chronologies mettant en évidence l'effet d'apports de Hg et Pb anthropiques à partir du siècle dernier, et une contamination maximale dans la décennie 1960-70. Les inventaires indiquent que, dans la partie amont du canyon du cap de Créus, les accumulations en Hg et Pb ont été multipliées respectivement par 2,5 et 1,6 au cours du vingtième siècle par rapport au siècle précédant. Si le plomb de l'essence est considéré comme la source dominante du Pb anthropique accumulé dans le canyon, il a représenté, à son maximum d'émission, de 25 à 40 % du Pb total apporté au sédiment. Aujourd'hui le Pb anthropique représente moins de 25% du total des apports de ce métal.

3.18 Impact des épisodes de formation d'eau dense sur la composition des sédiments marins profonds ? Étude de l'hétérogénéité spatiale par rapport à la variabilité temporelle

Marion Stabholz, Dominique Aubert, Xavier Durieu de Madron, Philippe Kerhervé, Christine Sotin, Gérard Jeanty, Roselyne Buscail, Serge Heussner

Le Golfe du Lion en Méditerranée occidentale est une région régulièrement impactée par d'importants événements hydrodynamiques (cascading d'eau dense et convection au large) responsables du transport et de la redistribution d'importantes quantités de sédiments et de matière organique et contaminants associés. Aussi, depuis 2005, un suivi temporel à pas de temps semestriel (dans le meilleur des cas) a été initié sur des stations du bassin profond et sur la pente afin de détecter les changements potentiels de composition du sédiment de surface liés à ces épisodes. Cependant, d'une campagne de prélèvement à l'autre, la position du carottage peut différer de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Jusqu'à présent aucune attention n'avait été portée sur l'influence d'une telle dispersion spatiale sur la représentativité des données censées représenter une unique station.

Aussi, en avril 2009, une étude complémentaire a été menée sur une station située dans la partie inférieure du canyon du Cap de Creus à 1900 m de profondeur (a priori très homogène) afin d'appréhender la variabilité spatiale à petite échelle (décimétrique à hectométrique) des propriétés à la fois physiques (par le biais de la granulométrie) et chimiques du sédiment de surface (0-0,5 cm) à partir de 27 échantillons. Les distributions spatiales ont été examinées à partir d'analyses variographiques qui permettent de comparer la variabilité à différentes échelles. Les résultats montrent que, sur la plupart des paramètres investigués (granulométrie, teneur en matière organique, teneurs en métaux...), la variabilité est similaire quelle que soit l'échelle à laquelle on se place. D'autre part, si l'on compare la variabilité spatiale à la variabilité interannuelle déterminée à partir de mesures sur un seul échantillon, il s'avère que celles-ci sont souvent du même ordre. Par conséquent, à cette station, la variabilité temporelle de composition du sédiment n'est pas significative et n'est pas à relier avec les épisodes hydrodynamiques extrêmes dont les effets semblent dilués. En conclusion, cette étude semble montrer que la connaissance de l'hétérogénéité spatiale du sédiment à petite échelle est essentielle pour des interprétations plus approfondies des variations temporelles des caractéristiques sédimentaires. Ce travail pose en outre la question de la « meilleure » stratégie d'échantillonnage à adopter lors des campagnes océanographiques.

3.19 Variabilité spatiale des taux de sédimentation et du stockage des radionucléides artificiels dans les berges du Rhône aval

Mireille Provansal, Emmanuelle Ferrand, Frédérique Eyrolle, Guillaume Raccasi, Rodolfo Gurriaran, Alain Champelovier, Pascal Paulat

Les relations entre le stockage sédimentaire dans les berges et leur taux de contaminants ont été analysées sur 6 sites situés dans des contextes géomorphologiques différents sur les berges du Rhône aval. Les sédiments ont été obtenus par le moyen de carottages (5 sites) et de prélèvements sur une coupe naturelle (1 site). Les profils mesurés des teneurs en ^{137}Cs , ^{241}Am and ^{210}Pb varient en fonction de la profondeur sur les différents sites, correspondent à différents stockages des sédiments contaminés. Ce constat est important pour les choix d'aménagement et de gestion future des marges alluviales.

Le centre de retraitement de Marcoule a représenté la source principale de radioactivité artificielle et la chronique de ses rejets fournit une chronologie fiable pour les 50 dernières années.

Trois sites enregistrent précisément l'historique de ces rejets. Ils correspondent à une rétention locale long terme des particules nucléarisées, apportées par les MES lors des crues depuis 50 ans environ. Les taux enregistrés sont nettement supérieurs au bruit de fond issu du bassin-versant. Deux sites n'enregistrent que les apports d'origine atmosphérique. Enfin, un site, correspondant à un ancien bras ennoyé, présente des taux constants de radioactivité, basse à moyenne.

La recherche d'une explication des variabilités des taux de sédimentation et du stockage des radionucléides repose sur une analyse géomorphologique détaillée. La granulométrie et la topographie des berges n'apparaissent pas comme des facteurs d'explication satisfaisants. Seul le site régulièrement connecté avec la nappe hydrologique fluviale pourrait montrer l'existence de phénomènes de désorption des contaminants. La chronologie de la « métamorphose » fluviale, qui transforme le Rhône au cours du 20^{ème} siècle, apparaît comme le facteur d'explication le plus important. Il permet de comprendre l'absence des radionucléides issus de Marcoule dans les berges deltaïques, formées précocement, et leur teneur élevée dans les berges en amont, construites depuis moins de 50 ans. La coïncidence chronologique, variable localement, entre l'approfondissement du chenal, la chronologie des fortes crues susceptibles d'apporter les sédiments des berges et la « fenêtre temporelle » des rejets de Marcoule expliquent donc la variabilité des teneurs en radionucléides sur les berges du Rhône aval.

3.20 Resuspension des particules et éléments traces métalliques associés sur le prodelta du Rhône

Olivier Radakovitch, Patrick Boyer, Valérie Devallois, Murielle Amiel, Fabien Anselmet, Abdramane Megninta

Quatre stations ont été échantillonnées sur le prodelta du Rhône par 20 et 40 m de fond en mars et octobre 2008 afin d'évaluer les relations entre les tensions critiques de remises en suspension des sédiments, la granulométrie des particules reprises et leur teneurs en éléments traces métalliques. Pour chaque site 6 à 4 tubes ont été prélevés et installés 24 à 48 h après dans le canal à courant de l'IRPHE à Marseille. Le courant dans le canal a été augmenté progressivement jusqu'à atteindre des tensions critiques sur le fond entraînant l'érosion et l'arrachage des particules. Des prélèvements ont été réalisés régulièrement au cours de l'expérience pour mesurer la quantité des particules resuspendues, leur granulométrie et leurs teneurs en éléments métalliques.

Les principaux résultats sont les suivants:

* Les tensions critiques d'érosion confirment certaines valeurs précédentes de la littérature pour cette zone. La tension critique pour le niveau de surface est évaluée entre 0,04 et 0,045 N.m-2. Cependant, lorsque le niveau de surface est érodé (quelques millimètres sans doute), les tensions critiques à appliquer pour remettre en suspension les niveaux sous-jacents augmentent à 0,15 puis 0,4 N.m-2. Avec ce type d'instrumentation, il reste impossible d'évaluer la relation entre l'augmentation de cette tension critique et la profondeur des couches reprises au fur et à mesure.

* Les granulométries indiquent que le sédiment pourrait pour partie être remis en suspension sous forme d'agrégats et non sous celles de ces particules constitutives (le diamètre des particules est plus élevé que celui mesuré dans les sédiments). Cependant, les granulométries mesurées en début de resuspension restent entachées d'erreur car la dilution vis à vis du volume du canal est importante, et les suspensions sont peu chargées pour le granulomètre.

* L'ensemble des métaux mesurés dans les carottes et sur les particules remises en suspension (Cd, Pb, Zn, Cu, Cr, Ni) ne montrent pas de variations nettes ou reproductibles au cours des expériences. La comparaison entre la surface des carottes et les teneurs sur les particules ne montrent pas non plus de différence notable. Il semble donc que les modèles de resuspension pourraient appliquer au matériel resuspendu les teneurs en métaux obtenues en surface du sédiment. L'erreur faite par ces modèles sur le devenir des contaminants lors des phases de resuspension serait sans doute plus liée à la taille des particules ou agrégats remis en suspension qu'à leurs teneurs en éléments chimiques : les particules resuspendues auraient les mêmes teneurs que le sédiment, mais pas la même granulométrie et donc vitesse de chute.

3.21 Modélisation du transport de la matière particulaire et des éléments associés dans le Golfe du Lion - Importance des événements extrêmes (crues, tempêtes et cascading)

Claude Estournel, Caroline Ulses, Patrick Marsaleix

L'objectif général est d'estimer le transfert de matière de la zone côtière du Golfe du Lion à la pente et plus spécifiquement aux canyons et d'identifier les processus impliqués dans ce transfert. Les outils sont le modèle hydrodynamique, le modèle de vagues et le modèle de transport sédimentaire basé sur 5 classes de particules primaires et une classe d'agrégats. Le modèle prend en compte les sédiments cohésifs et non cohésifs, les processus de pavage et de bioturbation.

La simulation analysée couvre 5 années de fin 2003 à fin 2008. Du point de vue de l'hydrologie fluviale, seule la crue du Rhône de décembre 2003 dépasse les $5000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ tandis que l'ouest du bassin a connu des crues fortes pendant l'hiver 2005-2006. Les concentrations de matières en suspension sont issues des observations pour le Rhône quand elles sont disponibles. Pour les autres fleuves, elles dérivent de relations empiriques.

On s'intéresse particulièrement à deux zones qui sont (1) le prodelta du Rhône qui agit comme un filtre et finalement une source secondaire de sédiments pour le plateau, et (2) le canyon du Cap de Creus maintenant connu comme principal exutoire du plateau vers la pente.

On a tout d'abord réalisé une validation poussée des courants et de la matière en suspension aux points pour lesquels on possède un suivi c'est-à-dire dans le canyon du Cap de Creus, d'une part, plutôt en tête de canyon (200 / 300 m) et d'autre part, plutôt en profondeur (750 / 1000 m). Les courants sont généralement bien reproduits aux différents niveaux et en particulier les maximums qui atteignent 80 cm/s le plus souvent en hiver. Les comparaisons de la matière en suspension sont plutôt également bonnes bien qu'il faille noter une tendance à la surestimation en début de période et une sous estimation en fin de période. Finalement les compensations d'une année sur l'autre font que le flux horizontal cumulé sur les 5 ans à 200/300 m au point de mesure est bien reproduit.

Les indicateurs de tempête (vagues) et de cascading (flux de chaleur) permettent de classer les événements, l'année 2005 étant une année de cascading, 2004 et 2008, plutôt des années tempête, 2006 une année mixte et 2007 une année très calme. Le modèle estime l'export du plateau sur les 5 années à 37 millions de tonnes sous forme de pics marqués au cours des tempêtes et de périodes d'export plus constant pendant les cascading. Finalement on a pu chiffrer l'export du plateau d'une part et le bilan de la pente d'autre part pour chacune des 5 années. Il ressort que l'export du plateau est fort lors des tempêtes mais faible pour les événements de cascading. La variabilité interannuelle sur les 5 années est de 3 à 14 millions de tonnes. A l'inverse du plateau, l'érosion de la pente est forte lors des épisodes de cascading et très faible (voire nulle) lors des tempêtes. Le schéma général qui se dégage est donc que les tempêtes érodent le plateau et transfèrent la matière sur le haut de la pente (tête du canyon de Cap de Creus). Cette matière est reprise par les courants forts issus du cascading et transférée vers les grandes profondeurs. Afin de faire le lien avec les métaux, on a calculé l'impact des tempêtes sur la remise en suspension du plomb et du zinc en considérant les concentrations présentes dans les fleuves et le sédiment et l'affinité des métaux pour le matériel fin. On a ainsi calculé les stocks de métaux remis en suspension sur le plateau ainsi que les concentrations associées dans la colonne d'eau et finalement les temps de résidence en suspension. On obtient typiquement des valeurs de quelques microgrammes de plomb par litre au cours de la forte tempête de février 2004 sur le plateau externe.

Finalement, on a présenté les premiers résultats de l'impact du changement climatique sur les transferts de matière en suspension. Ces travaux n'étant pas achevés, ils seront présentés plus largement dans le rapport final.

4 REFERENCES DES TRAVAUX REALISES DANS LE CADRE DU PROJET EXTREMA (SELON CLASSIFICATION ANR)

4.1 Publications

4.1.1 ARTICLES DANS DES REVUES A COMITE DE LECTURE

- Dennielou B., Jallet L., Sultan N., Jouet G., Pierre G., Voisset M. and Berné S., 2009, Post-glacial persistence of turbidite activity at the Rhône deep-sea turbidite system (Gulf of Lions, Western Mediterranean): linking the outer shelf and the basin sedimentary record, *Marine Geology*, 257, Issues 1-4, 65-86.
- Elbaz-Poulichet F., Dezileau L., Freyrier R., Cossa D., Pierre Sabatier P., A 3500-year record of Hg and Pb contamination in a Mediterranean sedimentary archive (the Pierre Blanche Lagoon, France), *Environmental Science and Technology*, accepté.
- Eyrolle F., Claval D., Gontier G., Antonelli C., 2008, Radioactivity level in major French rivers: Chronicles acquired over the past thirty year and current status, *Journal of Environmental Monitoring*, 10, 800-811.
- Eyrolle F., Masson O., Antonelli C., Arnaud M., Charmasson S., 2009, The EXTREME project - Consequences of paroxysmic meteorological climatic events on the translocation of contaminants within the geosphere, *Radioprotection*, vol.44, N°5, 463-468.
- Eyrolle F., Radakovitch O., Raimbault P., Antonelli C., Ferrand E., Raccasi G., Aubert D., Gurriaran R., 2010, Long term survey of suspended sediment and associated natural and artificial radionuclides transport in the Rhône River (south eastern France), *Applied Geochemistry*, submitted.
- Ferrand E., Eyrolle F., Radakovitch O., Provansal M., Dufour S., Vella C., Raccasi G., Gurriaran R., 2010, Historical levels of heavy metals and artificial radionuclides reconstructed from overbank sediment records in lower Rhône River (South - East France), *Geochimica and Cosmochimica Acta*, special Issue on Environmental Records of Anthropogenic Impacts, sous presse.
- Heimbürger L. E., Cossa D., Thibodeau B., Khripounoff A., Mas V., Chiffolleau J. F., Schmidt S., Migon C., Mercury and other trace metals of environmental concern in sediments from the Var canyon and the DYFAMED site (Ligurian Sea, Northwestern Mediterranean), *Chemical Geology* in press.
- Maillet G.M., Vella C., Sabatier F., Poizot E. and Méar Y., 2011, Sediment transport pattern in a microtidal river mouth using geostatistical sediment trend analysis (GSTA). The case of the Grand Rhone River, France, *Journal of Sedimentary Research*, 81, 138-152.
- Maillet G.M., Poizot, E., Sabatier F., Vella C. & Mear Y., 2011, Sediment transport pattern in a microtidal river mouth using geostatistical sediment trend analysis (GSTA), The case of the Grand Rhone River, France, *Journal of Sedimentary Research*, 81, 138-152.
- Marion C., Dufois F., Arnaud M., Vella C., 2010, In situ record of sedimentary processes near the Rhône River mouth during winter events (Gulf of Lions, Mediterranean Sea), *Continental Shelf Research*, 30, 1095-1107.
- Marion C., Maillet G., Arnaud M., Eyrolle F., 2010, Quantifications des flux solides rhodaniens à l'embouchure: apports de la Durance pendant la crue exceptionnelle de mai 2008. *La Houille Blanche*, 5-2010, 72-80.
- Marion, C., Maillet G. M., Arnaud, M. and Eyrolle, F., 2010, Estimations of the Rhône solid fluxes near the river mouth: inputs of the Durance during the extreme flood of May 2008, *La Houille Blanche*, 5, 72-80.
- Masson O., Piga D., Gurriaran R., D'Amico D., 2010, Impact of an exceptional Saharan dust outbreak in France: PM10 and artificial radionuclides concentrations in air and in dust deposit. *Atmospheric Environment*, 44, 2478-2486.
- Masson O., Piga D., Mary C., Le- Roux G., Renaud P., De Vismes D., Gurriaran R., Paulat P., Saey L., 2009, Recent trends and explanation for airborne 137Cs activity levels increases in France, *Radioprotection*, vol 44, n°5, pp 327-332.
- MERMEX group: Durrieu de Madron X., Guieu C., Sempéré R., Conan P., Cossa D., Rabouille C., Guizien K., Estournel C., Loye-Pilot M.-D., Charmasson S., Eyrolle F., Merle P.L., Thébaud H., 2011, Marine Ecosystems Responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean, *Progress in Oceanography*, 91, 97-166.
- Piga et al., 2010, Impact of wildfires in Eastern Europe and Russian Federation on persistence of airborne caesium-137 at the European scale. Submission to *Journal of Geophysical Research*.
- Poizot, E., Beryounia, K., Chaïbi, M., Murat, A., Maillet, G.M. and Méar, Y., 2011, Optimisation de la méthode GSTA (Grain Size Trend Analysis) par son intégration dans une approche géomatique, Soumis à *Paralia*.
- Provansal M., Ferrand E., Eyrolle F., Raccasi G., Spatial variability of sedimentation rates and radionuclide storage in alluvial margin of the lower Rhône River, aquatic sciences, special issue, accepté.
- Provansal M., Villiet J., Eyrolle F., Raccasi G., Gurriaran R., Antonelli C., 2010, High-resolution evaluation of recent bank accretion rate of the managed Rhone: A case study by multi-proxy approach, *Geomorphology*, 117, 287-297.
- Vassas, C., Sabatier, F., Vella, C., 2008 Résultats préliminaires sur le taux de transport à l'embouchure du grand Rhône (se de la France) *La Houille Blanche*, 4, 35-40.

4.1.2 ARTICLES FRANCE

Poizot E., K. Beryounia, M. Chaïbi, A. Murat, G.M. Maillet et Y. Méar, Optimisation de la méthode GSTA (Grain Size Trend Analysis) par son intégration dans une approche Géomatique, revue Paralia, MEDDLT Editions.

4.2 Communications

4.2.1 COMMUNICATIONS INTERNATIONALES

- Aubert D., Eyrolle F., Sotin C., Antonelli C., Kerhervé P., Gueneugues A., 2011, Annual fluxes of potentially harmful elements (PHE's) exported by the Rhône River particulate matter. Influence of flood events. 12th International Symposium on the Interactions between Sediments and Water, June 19-24 2011, Dartington hall, England.
- Aubert D., Métais A., Kerhervé P., Kim J.H., 2007, Characterization of trace metals contents in river suspended matter entering the Gulf of Lions (France). Abstract A-03447, EGU General Assembly 2007, Vienna, p.222.
- Cadiou F., M. Répécaud, M. Arnaud, C. Rabouille, P. Raimbaud, O. Radakovitch, S. Meulé, P. Gauffres, 2010, MESURHO - A high frequency oceanographic buoy at the rhone river mouth, CIESM 39th congress, Venice 2010.
- Eyrolle F., Antonelli C., Raimbault P., Boullier V., Arnaud M., 2010, SORA: a high frequency flux monitoring station at the lower Rhône River, proceedings of the 39th CIESM Congress, Venice, Italy, 10 - 14 May 2010
- Eyrolle F., Provansal M., Villiet J., Raccasi G., Radakovitch O., Gurriaran R., Antonelli C., 2008, Evidence for delayed source of long lived artificial radionuclides from a managed river banks (Rhône River, Southern France), 11th International Symposium on the Interactions between Sediments and Water, February 17-22 2008, Esperance, Australia.
- Eyrolle F., Raimbault P., Antonelli C., Ferrand E., Aubert D., Radakovitch O., 2010, Suspended Sediment and associated radionuclides transport : 2001-2008 flood monitoring at the lower Rhône river, proceedings of the 39th CIESM Congress, Venice, Italy, 10 - 14 May 2010.
- Eyrolle F., Rolland B. and Gurriaran R., 2008, Consequences of the Rhône River floods on 137Cs, 238Pu and 239+240Pu fluxes towards the Mediterranean Sea, 11th International Symposium on the Interactions between Sediments and Water, February 17-22 2008, Esperance, Australia.
- Ferrand E., Eyrolle F., Provansal M., Dufour S., Radakovitch O., Raccasi G., Gurriaran R., 2009, Heavy metals and artificial radionuclides records in riverbanks sediments of the lower Rhône river (South - East France), 19th V.M. Goldschmidt™ conference, 21-26 june, Davos, Switzerland.
- Maillet G., Vella C., Sabatier F., Poizot E., Mear Y., 2009, Transfer of fluvial bedload during flood events in a microtidal river mouth and associated beach nourishments (Rhône River mouth, France). Proceeding of the 31st journées de l'hydraulique of Société Hydrotechnique de France, Paris, 21-22 septembre 2009, ISBN 2-906831-79-4.
- Marion C., Dufois F., Vassas C., Arnaud M., In situ record of sedimentary processes near the Rhone River mouth during the winter 2006 (Gulf of Lions; Mediterranean sea) 11th International Symposium on the Interactions between Sediments and Water, February 17-22 2008, Esperance, Australia.
- Marion C., Maillet G., 2009, Estimation of the Rhone solid fluxes near the River mouth: inputs of the Durance River during the extreme flood event of may 2008. Proceeding of the 31st journées de l'hydraulique of Société Hydrotechnique de France, Paris, 21-22 septembre 2009, ISBN 2-906831-79-4.
- Masson O., Piga D., Paulat P., De Vismes A., Demoisson A., 2010, Respective contribution of dust load and weighted dust concentration in enhancing airborne artificial radioactivity levels during recent Saharan dust outbreaks in France, Goldschmidt Conference (Global Aerosol Source and Sink Processes) June 21 - 26, 2009 Davos, Switzerland.
- Piga D., Masson O., Despiau S. Processes involved in the persistence of caesium-137 in the atmospheric compartment. Oral communication. International Aerosol Conference, august 29- september 3, 2010, Helsinki.
- Piga D., Masson O., Despiau S., 2009, Using radionuclides as tracers of natural process emissions, 19th V.M. Goldschmidt™ conference, 21-26 june, Davos, Switzerland.
- Piga D., Masson O., Despiau S., Le Roux G., Mary J., Paulat P., Saey L., Persistence of 137Cs in the atmospheric compartment, European Aerosol Conference, August 24-29 2008, Thessalonique, Greece.
- Poizot E., Chaïbi M., Mear Y., Murat A. and Beyrouni K., 2010, La granulométrie des sédiments : un marqueur des événements extrêmes. 1er colloque international Littoraux des Pays Méditerranéens : états passés, actuels et futurs, Larache, 10-12 novembre 2010, Maroc.

4.2.2 COMMUNICATIONS FRANCE

- Aubert D., Sotin C., Eyrolle F., Antonelli C., Gueneugues A., Kerherve P., 2008. Estimation des flux annuels en éléments traces métalliques véhiculés par les MES sur le Rhône. Importance de la prise en compte des événements de crue. Cas de l'année 2008. 23ème Réunion des Sciences de la Terre, Bordeaux, 25-29 octobre 2010.
- Fanget A.S., Bassetti M.A., Goineau A., berné S., Fontanier C., Jouet G., Cossa D., Arnaud M., Buscail R., Maillet G., Dennielou B. et Roubi A., 2010. Histoire sédimentaire récente du Rhône révélée par une approche multi-proxy (Golfe du Lion, NW Méditerranée), 23ème Réunion des Sciences de la Terre, Bordeaux, 25-29 octobre 2010.
- Marion C. et Maillet G., 2009, Quantifications des flux solides rhodaniens à l'embouchure : apports de la duranc pendant la crue exceptionnelle de mai 2008. Congrès SHF- 31ème Journées de l'hydraulique : «Morphodynamique et gestion des sédiments dans les estuaires, les baies et les deltas», Paris, 27-28 septembre 2009.
- Piga D., Bourcier L., Mary J., Le Roux G., Paulat P., Saey L., Despiau S., Masson O., Rémanence du 137Cs dans le compartiment atmosphérique, 23ème Congrès Français sur les Aérosols, 16-17/01/2008, Paris.
- Piga D., Masson O., Despiau S., Utilisation d'un radionucléide artificiel comme traceur de processus naturels d'émissions dans l'atmosphère, 25ème Congrès Français sur les Aérosols, 13-14/01/2010, Paris.
- Provansal M., Desmet M., Babut M., Bravard J.P., Bonté P., Dufours S., Eyrolle F., Ferrand E., Levrevre I., Persat H., Raccasi G. et Roux G., 2009, Dynamique fluviale, stockages sédimentaires et distribution des contaminants dans les dépôts des marges et des annexes fluviales (Observatoire des Sédiments du Rhône), Colloque 'Les grands fleuves vont à la mer - de la production de connaissance à la gestion durable d'environnements d'exception', ZABR Zone Atelier du Bas Rhône, 30 novembre et 1er décembre 2009, Lyon.

4.3 Articles de diffusion

4.3.1 ARTICLES VULGARISATION

- Masson O., Eyrolle F., Antonelli C., 2008, Le Rhône est-il pollué par les radionucléides artificiels ? La qualité de l'eau du Rhône, In Bravard J-P., Clémens, A. « Le Rhône en 100 questions » Editions du Graie.
- Provansal, M. et Sabatier, F., 2008, Pourquoi la côte de la Camargue recule-t-elle ? In Bravard J-P., Clémens, A. « Le Rhône en 100 questions » Editions du Graie.

4.3.2 CONFERENCES VULGARISATION

- Provansal M., Desmet M., Babut M., Bravard J.P., Bonté P., Dufours S., Eyrolle F., Ferrand E., Levrevre I., Persat H., Raccasi G. et Roux G., 2009, Dynamique fluviale, stockages sédimentaires et distribution des contaminants dans les dépôts des marges et des annexes fluviales (Observatoire des Sédiments du Rhône), Colloque 'Les grands fleuves vont à la mer - de la production de connaissance à la gestion durable d'environnements d'exception', ZABR Zone Atelier du Bas Rhône, 30 novembre et 1er décembre 2009, Lyon.

4.4 Ouvrages Chapitres d'ouvrages

- Masson O., Eyrolle F., Antonelli C., 2007, Le Rhône est-il pollué par les radionucléides artificiels ? La qualité de l'eau du Rhône, Dans « Le Rhône en 100 questions », ouvrage collectif sous la direction de Jean Paul Bravard et Anne Clémens, ZABR (Zone Atelier du Bas Rhône), Lyon, juin 2008.

4.5 Thèses soutenues, ou en cours

4.5.1 FINANCEES PAR L'ANR

Le financement ANR a été ciblé sur le recrutement de post doctorant

4.5.2 NON FINANCEES PAR L'ANR MAIS DIRECTEMENT LIEES AU PROGRAMME

DUFOIS François, Thèse IRSN - PACA « Modélisation du transport particulaire et des traceurs radioactifs dans le Golfe du Lion » (décembre 2004 - mai 2008), soutenue 5 décembre 2009, Ecole Doctorale des Sciences de l'environnement, Université du Sud Toulon Var, Rapport IRSN/IRSN 2008/109.

MARION Cédric, Thèse IRSN « Dynamique et bilan des transferts particuliers de radioéléments d'origine anthropique et naturelle dans le Golfe du Lion : cas particulier des apports rhodaniens » (janvier 2006 - janvier 2009), soutenue le 12 mars 2010, Ecole Doctorale de Science Energie et Environnement, Université de Perpignan Via Domitia, Rapport IRSN/IRSN 2010/131.

PIGA Damien, Thèse IRSN « Processus engagés dans la rémanence au niveau du compartiment atmosphérique des radionucléides artificiels antérieurement déposés » (octobre 2007 - octobre 2010, soutenue le 10 décembre 2010, Ecole doctorale Sciences Fondamentales et Appliquées, Université du Sud Toulon Var.

RACCASI Guillaume, Thèse CEREGE, Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval, Recherches en vue de la restauration hydraulique et de la gestion des crues, soutenue le 13 juin 2008, Ecole Doctorale 355 : Espace, Culture, Sociétés, Université de Provence - Aix-Marseille I.

STABHOLZ Marion, Thèse ministérielle - CEFREM, Impact des plongées d'eau dense hivernale (cascading) sur la dynamique de la matière organique en zone côtière (octobre 2008 - octobre 2011, date de soutenance non fixée), Ecole Doctorale 305 : Energie Environnement, Université de Perpignan Via Domitia.

HIGUERAS Marina, Thèse ministérielle - CEFREM, Effets des événements météo-climatiques en zone côtière. Impact sur le transfert de matière organique particulaire au Golfe du Lion. (octobre 2010-octobre 2013), Ecole Doctorale 305 : Energie Environnement, Université de Perpignan Via Domitia.

DUMAS Chloé, Thèse ministérielle - CEFREM, Impact des événements intenses sur le transfert des éléments traces métalliques en milieu marin (octobre 2010-octobre 2013), Ecole Doctorale 305 : Energie Environnement, Université de Perpignan Via Domitia.

HEIMBÜRGER Lars-Eric - Thèse Ifremer-PACA-LOV "Dynamics of chemical contaminants in the open ocean, the Mediterranean Sea as an example - DYCOMED", soutenue le 20 Avril 2010.

TIANO Marion - Thèse Ifremer - Rôle du plancton dans le transfert trophique des contaminants en Méditerranée nord occidentale (2010-2012).

FRAYSSE Marion - Thèse Ifremer - Rôle du forçage physique sur l'écosystème à l'est du Golfe du Lion : modulation de l'impact des apports anthropiques en sels nutritifs et matière organique étudiée par modélisation 3D couplée physique et biogéochimique (2011-2013).

4.6 Post doctorants

4.6.1 FINANCES PAR L'ANR

FERRAND Emmanuelle, 2010, Détermination des niveaux historiques en radionucléides et éléments trace métalliques à partir d'enregistrements sédimentaires au sein des marges alluviales du Rhône aval et de la Têt, Contribution au projet ANR EXTREMA (contrat N° ANR-06-VULN-005-2007-2011), Rapport de Post Doctorat, Rapport DEI/SESURE 2010-02.

RACCASI Guillaume, Bedload contribution to sediment export in the lower Rhône River, Contribution au projet ANR EXTREMA (contrat N° ANR-06-VULN-005-2007-2011).

CASTELLE Sabine, Suivi des apports en mercure au Golfe du Lion par voies atmosphérique et fluviale, Contribution au projet ANR EXTREMA (contrat N° ANR-06-VULN-005-2007-2011), Rapport de Post doctorat.

4.7 Rapports

- Abintou T., 2010, Cartographie de la couverture sédimentaire de l'embouchure du Rhône par calibration et validation de signaux acoustiques (Système RoxAnn). Rapport de stage Master Ingénierie des Hydrosystèmes et des Bassins Versants, IMACOF, Université de Tours, 32p.
- Allogho Ondo R., 2010, Etude géostatistique d'analyses d'éléments traces métalliques dans les sédiments profonds du Golfe du Lion, mémoire de stage de M2 recherche, Université de Perpignan.
- Antonelli, 2008. Flux de radioactivité exportés par le Rhône en Méditerranée en 2008 - Station Observatoire du Rhône en Arles (SORA). Rapport IRSN/DEI/SESURE 2010-04.
- Arnaud M., 2009, Projet CARMA (Conséquences des Apports Rhodaniens sur le Milieu littoral Associé : cas des événements extrêmes) 2005-2007, Rapport DEI/SESURE 2009-16.
- Castelle S., 2010, Suivi des apports en mercure au Golfe du Lion par voies atmosphérique et fluviale, Contribution au projet ANR EXTREMA (contrat N° ANR-06-VULN-005-2007-2011), Rapport final de post doctorat IFREMER.
- Eyrolle et al ; 2007, EXTREMA contrat ANR-06-VULN-005, Episodes météo climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier, avancement juin 2007, Rapport DEI/SESURE 2007-53.
- Eyrolle et al ; 2007, EXTREMA, Episodes météo climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier, Dossier déposé en réponse à l'AAP de l'ANR programme Vulnérabilité milieux et climat 2006, Rapport DEI/SESURE 2007-40.
- Eyrolle et al ; 2008, EXTREMA contrat ANR-06-VULN-005, Episodes météo climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier, avancement juin 2008, Rapport DEI/SESURE 2008-37.
- Eyrolle et al ; 2008, EXTREMA contrat ANR-06-VULN-005, Episodes météo climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier, avancement décembre 2007, Rapport DEI/SESURE 2008-22.
- Eyrolle et al ; 2009, EXTREMA Contrat ANR-06-VULN-005, Episodes météo climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier, avancement décembre 2008, Rapport DEI/SESURE 2009-15.
- Eyrolle et al ; 2009, EXTREMA contrat ANR-06-VULN-005, Episodes météo climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier, avancement juin 2009, Rapport DEI/SESURE 2009-38.
- Ferrand E., 2010, Détermination des niveaux historiques en radionucléides et éléments trace métalliques à partir d'enregistrements sédimentaires au sein des marges alluviales du Rhône aval et de la Têt, Contribution au projet ANR EXTREMA (contrat N° ANR-06-VULN-005-2007-2011), Rapport de Post Doctorat IRSN, Rapport DEI/SESURE 2010-02.
- Kassa R., 2010, Etude des variations des teneurs en Cu et Pb dans la zone de mélange entre Arles et la proche embouchure, mémoire de stage de M1 GMA, Université de Perpignan.