

IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE*Faire avancer la sûreté nucléaire*Agence Nationale de la Recherche
ANR**Ifremer**

ANR EXTREMA

Rapport final

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° 2011-33

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 - Rapport final
Numéro de la fiche programme	EXTREMA - 15000126/0010
Processus de rattachement	R4

ANR EXTREMA

Rapport final

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

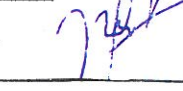
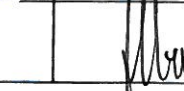
janvier 2007 - juin 2011

Programme Vulnérabilité : milieux et climat 2006 de l'ANR

Contrat N° ANR-06-VULN-005

Laboratoire d'Étude Radioécologique en milieux Continental et Marin

DEI/SESURE/2011-33

	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	G. MANIFICAT	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	08/12/2011	03/12/2011	22/12/11	8/1/2012	
Signatures					

DIFFUSION : Libre ☒ Interne ☐ Limitée ☐

LISTE DES PARTICIPANTS (PAR ORGANISME PUIS PAR ORDRE ALPHABÉTIQUE)

Nom	Organisme
Eyrolle Frédérique	IRSN/DEI/SESURE/LERCM Coordination projet - Coordination IRSN
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
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
Aubert Dominique	CEFREM Coordination CEFREM - UMR 5110
Bassetti Maria Angela	CEFREM
Berné Serge	CEFREM
Buscail Roseline	CEFREM
Carbonne Jacques	CEFREM
Dumas Cloé	CEFREM, Thèse
Durieu de Madron Xavier	CEFREM
Fanget Anne Sophie	CEFREM, Thèse
Geuneugues Audrey	CEFREM
Heussner Serge	CEFREM
Jeanty Gérard	CEFREM
Ludwig Wolfgang	CEFREM
Sotin Christine	CEFREM
Stabholz Marion	CEFREM, Thèse

Sabatier François	CEREGE Coordination CEREGE - UMR 6635
Dufour Simon	CEREGE
Noack Yves	CEREGE
Provansal Mireille	CEREGE
Raccasi Guillaume	CEREGE, Post Doctorant
Radakovitch Olivier	CEREGE
Vella Claude	CEREGE
Cadiou Jean François	IFREMER Coordination IFREMER - centre de Toulon
Castelle Sabine	IFREMER - centre de Toulon, Post Doctorante
Cossa Daniel	IFREMER - centre de Toulon
Dennielou Bernard	IFREMER - centre de Brest
Gonzalez Jean Louis	IFREMER - centre de Toulon
Jouet Gwenael	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
Autres Collaborateurs	
Megninta Abdramane	ENI-ABT (Bamako)
Anselmet Fabien	IRPHE - UMR 6594
Amielh Muriel	IRPHE - UMR 6594
Maillet Grégoire	Université d'Angers, BIAF

RESUME

Le projet EXTREMA coordonné par l'IRSN a été élaboré en multipartenariat en réponse à l'AAP de l'ANR émis en juin 2006 sur son programme VMC « Vulnérabilité Milieu et Climat »¹. Il a été retenu pour financement par notification du 18 avril 2007 (Décision d'aide ANR-06-VULN-005) pour une durée initiale de 48 mois à compter du 1^{er} janvier 2007. Le contrat a été prolongé de six mois sur demande du consortium (août 2010) et approbation de l'ANR (Décision modificative d'aide du 29 septembre 2010). EXTREMA a été labellisé et soutenu par deux pôles de compétitivité : Le pôle « mer Paca » à vocation mondiale ainsi que le pôle « Gestion des risques et vulnérabilité de territoires » à vocation régionale. EXTREMA a impliqué les équipes de l'IRSN, du CEFREM (UMR 5110), du CEREGE (UMR 6635), de l'IFREMER (Centres de Toulon et Brest) et le Laboratoire d'Aérodynamique du Pôle d'Océanographie Côtière de l'Observatoire Midi-Pyrénées (UMR 5560).

Il avait pour objectifs d'acquérir des données à l'échelle du Golfe du Lion, depuis les bassins versants des fleuves côtiers du pourtour de la méditerranée Nord occidentale jusqu'aux canyons du milieu sous marin profond en marge du plateau continental, afin d'enregistrer les flux de matières et les flux de contaminants lors d'épisodes météo climatiques de grande ampleur. En effet, les travaux antérieurs des différentes équipes avaient souligné l'importance des événements extrêmes dans le déplacement et le transfert des masses au sein des différents compartiments de la biogéosphère, ainsi que le poids de ces forçages dans les bilans matières réalisés à différentes échelles spatio-temporelles (MERMEX group, 2011).

Le système côtier du Golfe du Lion a été choisi en raison de sa vulnérabilité à la fois aux épisodes météo climatiques de grande amplitude (poussières d'origine saharienne, crues du Rhône, tempêtes, épisodes de coulées d'eau dense (cascading) et convection au large) et aux sources de pollutions (radioactivité d'origine artificielle, métaux traces, composés organiques persistants). La mise en place et la consolidation d'observatoires en des points stratégiques du Golfe du Lion ont permis d'acquérir des données clés dans la compréhension des processus de transfert associés à ces épisodes extrêmes et pour le développement, la validation et l'utilisation de modèles hydro sédimentaires à différentes échelles d'espace et de temps (prodeltas/bassin méditerranéen occidental, événementiel/inter annuel). Ce document constitue le rapport final du projet et présente de manière synthétique, tel que demandé par l'ANR, les principaux résultats marquants du projet.

Au terme du projet, les transferts de matière et de contaminants associés aux forçages climatiques prédéfinis ou à des forçages anthropiques (lâchers de barrages) ont été évalués. Les différents vecteurs de transfert inter compartiments et les dynamiques des principaux milieux d'accumulation (puits) ou d'alimentation (sources) tels que les poussières atmosphériques, les marges alluviales et dépôts d'inondation, les prodeltas et les canyons du milieu marin profond ont été caractérisés. Nos travaux ont permis de mettre en évidence qu'une modification significative à plus ou moins long terme de la distribution des polluants au sein de certains systèmes côtiers pourrait être liée à la réduction du cascading et de la convection. Une des conséquences majeures de ce changement abrupt serait une séquestration des polluants au niveau des plateaux continentaux, lieux privilégiés de la production primaire et siège de développement des ressources marines.

¹ Actuellement, et depuis 2008, ce programme est devenu le programme VMCS « Vulnérabilité Milieu Climat et Société ».

ABSTRACT

The project EXTREMA, coordinated by IRSN, was developed in response to the ANR proposals issued in June 2006, on its program "Vulnérabilité Milieu et Climat » (VMC). The project coordinated by IRSN was developed in response to the AAP of ANR issued in June 2006 on its program "Environment and Climate Vulnerability" (VMC). The project was selected for funding by notice dated 18 April 2007 (Decision support ANR-06-Vuln-005) for an initial period of 48 months from 1 January 2007. The contract was extended for six months at the request of the consortium (August 2010) and approval of the ANR (amending Decision aid of September 29, 2010). EXTREMA was certified and supported by two clusters: The cluster "Mer PACA" oriented world and the cluster "Risk and vulnerability of territories" of regional concern. EXTREMA involved teams from the IRSN, the CEFREM (UMR 5110), the CEREGE (UMR 6635), IFREMER (Brest and Toulon Centres) and the LA (Laboratoire d'Aérodynamique) from the Pôle d'Océanographie Côtière de l'Observatoire Midi-Pyrénées (UMR 5560). The objectives of EXTREMA were to acquire data to record the flow of materials and contaminants during episodes of large-scale climate extremes. Data were collected across the Gulf of Lions, from the coastal river watersheds bordering the Mediterranean to the North Western submarine canyons in the middle deep margin of the continental shelf. Indeed, previous works performed by the various teams have stressed the importance of extreme events in the movement and transfer of masses in the different compartments of the biogeosphere, and the weight of these stressors in the mass balances conducted at different spatial and temporal scales (MERMEX Group, 2011). The coastal system of the Gulf of Lions was chosen because of its vulnerability to weather extremes, characterised by episodes of large amplitude (dust of Saharan origin, Rhone floods, storms), periods of dense water flows (cascading and convection), and sources of pollution (artificial radioactivity, trace metals, persistent organic compounds). The establishment and consolidation of observatories at strategic points in the Gulf of Lion has gained key information for understanding the transfer processes associated with these extreme events, and the development, validation and use of sedimentary hydro models at different scales of space and time (prodelta / Western Mediterranean basin, events / inter annual). This final report summarizes, as requested by ANR, the main significant results of the project. At the end of the project, mass transfer of contaminants associated with climate forcings or anthropogenic forcings (dam releases) were evaluated. The various inter-compartment major transfer vectors were identified. The mass dynamics of the major media acting as sinks (accumulation) and/or sources (supply) such as atmospheric dust, margins and alluvial deposits of flooding, prodeltas and deep canyons of the marine environment have been characterized. Our work has highlighted a significant change in the longer term the distribution of anthropogenic pollutants in some coastal systems may be related to the reduction of cascading and convection. A major consequence of this abrupt change would be a sequestration of pollutants at the continental shelves, privileged places of primary production and head of development of marine resources.

MOTS-CLES

EXTREMA, ANR, changement climatique, vulnérabilité, transfert, contaminants, radionucléides, éléments traces, sédiments, système côtier, Golfe du lion, poussières sahariennes, rivières, bassin versants, crues, tempêtes, convection, cascading, plongée d'eau dense, modélisation hydro sédimentaire.

Sommaire

1 IDENTIFICATION	3
2 LISTE DES LIVRABLES ET AFFECTATION EVENTUELLE A CHAQUE PARTENAIRE	3
2.1 TACHES, LIVRABLES ET PROGRAMMATION DU PROJET	3
2.2 DATES DES REUNIONS (LANCEMENT, ANNUELLE, CLOTURE) DU PROJET	6
2.3 TAUX D'AVANCEMENT DE L'ENSEMBLE DU PROJET (OPTIONNEL)	6
3 RAPPORT FACTUEL	7
3.1 TABLEAU DE RESULTATS.....	7
3.1.1 Nombre de publications.....	7
3.1.2 Autres retombées	7
3.2 TABLEAU DE PERSONNELS	7
3.3 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS	8
3.3.1 Articles multipartenaires	8
3.3.2 Articles monopartenaires	9
3.3.3 Ouvrages, chapitres d'ouvrage	9
3.3.4 Conférences nationales	10
3.3.5 Conférences internationales	10
3.3.6 Présentations sur poster	11
3.3.7 Diffusion-Vulgarisation	11
3.3.8 Thèses soutenues, ou en cours	12
3.3.9 Post doctorat financés par l'ANR.....	13
3.4 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION.....	13
3.4.1 Conséquences du projet (lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...)	13
3.4.2 Développement d'un nouveau partenariat.....	14
3.4.3 Création de plate-forme à la disposition d'une communauté	14
3.4.4 - Autres (ouverture internationale,...)	15
4 RAPPORT SCIENTIFIQUE.....	17
4.1 RESUME CONSOLIDE	17
4.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART	18
4.3 MATERIEL ET METHODES.....	19
4.3.1 Les observatoires et échantillons archives.....	19
4.3.2 Les campagnes océanographiques.....	20
4.3.3 Expérimentations en canal à courant.....	20
4.3.4 Les modèles hydro sédimentaires	21
4.4 RESULTATS.....	22

4.4.1 Fréquence des épisodes météo climatiques extrêmes sur la zone côtière du Golfe du Lion -Tendances actuelles et attendues (synthèse des connaissances)	22
4.4.2 Flux évènementiels de matière générés par les épisodes météo-climatiques intenses - Quantification et contribution/flux moyens.....	23
4.4.3 Compartiments-puits (Berges, prodeltas, canyons et bassin profond)	25
4.4.4 Vecteurs préférentiels de transfert (suspension/charriage, translocation, chenaux, canyons).....	25
4.4.5 Modélisation du transport de la matière particulaire et des éléments associés dans le Golfe du Lion - Importance des événements extrêmes (crues, tempêtes et cascading)	26
4.5 DISCUSSION	27
4.6 CONCLUSIONS	28
4.7 BIBLIOGRAPHIE	29



CEFRM



1 IDENTIFICATION

Programme - année	VMC 2006
Projet (acronyme)	EXTREMA
Titre complet du projet	Episodes météo-climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier
Coordinateur du projet (société/organisme)	IRSN Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
Période du projet (date début - date de fin)	janvier 2007 - juin 2011
Rapport confidentiel (OUI/NON)	NON
Date de fin de confidentialité	-

Rédacteur de ce rapport

Civilité, prénom, nom	Dr Frédérique EYROLLE
Téléphone	+33 (0)4 42 19 95 12
Adresse électronique	Frederique.eyrolle@irsn.fr
Date de rédaction	05 octobre 2011

2 LISTE DES LIVRABLES ET AFFECTATION EVENTUELLE A CHAQUE PARTENAIRE

2.1 TACHES, LIVRABLES ET PROGRAMMATION DU PROJET

Le **tableau 1** liste les principales tâches et livrables du projet qui ont été définis lors du démarrage du projet. Le **tableau 2** synthétise la programmation et les niveaux de réalisation des actions au cours des 54 mois du projet.

Extreme events	Work scheduled	Partners
A Precipitation Atmospheric solid load and Saharan dust	A1 Atmospheric solid fluxes and associated contaminants: Use of high volume aerosol sampling device from the existing OPERA network A2 Saharan dust fluxes and associated contaminants: Monitoring of dust events based on dust forecast from the web site of the Athens University and sampling of the major ones (about 5/year) either under dry or wet forms. Use of large surface collector. A3 Precipitations: Use of a rainfall radar for the determination of the rain along the vertical and the variation of the associated parameters during the event. Rain type characterization based on intensity, duration, cumulated amount during the event. Wet-only deposition sampling with an automated rain gauge and a large(>3m²) opening collector (to be acquired). Comparison with a bulk collector to determine the dry deposition over monthly averaged periods. For A1 and A2 sampling sites are located between Toulon and Cadarache.	1,2,3 1,2,3 1,2,3
B Floods and flooding	B1 Quantification of liquid and solid fluxes and associated contaminants of the Rhône and Têt rivers: Monitoring by the OPERA and POEM platforms. B2 Contribution of bed load to solid fluxes and associated contaminants: Direct flux and bathymetric measurements at the Rhône mouth. B3 Contribution of bank erosion to the solid fluxes and associated contaminants: 2 sites on the lower Rhône: casier Saxy/Pillet bank; Petite Argence. B4 Assessment of past contamination levels in the Rhône and Têt rivers: Analysis of selected sediment depositories (banks, locks, ...). B5 Flooding: In case of no flooding events during the project, samples collected during the December 2003 flood around Arles and in the "Petite Camargue" area will be used.	1,2,3 1,2,3 1,2,3 1,2,3 1,2,3
C Storms	Quantification of sediment mass reworking and associated contaminant remobilization within the continental shelf based on: C1 CARMA project instrumentation moored at the Rhône mouth. C2 FRAME instrumentation (trace metal fluxes only) deployed in the Gulf of Marseille and close to the Rhône prodelta. C3 POEM-L2R platform dedicated to solid fluxes and associated trace metals investigations within the Têt prodelta. C4 Recirculating flume experiments (COM, Marseille) to acquire key data for modelling.	1,2,3 4 2,4 1, 2, 3
D Dense water cascading	D1 Quantification of sediment and associated contaminant fluxes induced by cascading: 3 instrumented moorings deployed between 1000 and 2500 m depth in the Planier, Sète and Lacaze-Duthiers canyons. Each mooring, deployed for 6-m periods, are equipped with 2 trap/current meter pairs at 30 and 500 m above the bottom. Analysis of selected samples from the long term (>13 y) time series in the LD and Planier canyons to detect potential inter-annual trends in the level of contaminants. Analysis of superficial sediment cores (upper 5 mm). D2 Occurrence of extreme events during the Holocene on the continental slope and the deep basin: Analysis of data from existing sediment cores from the outlet of the canyon of Sète (additional datings (²¹⁰Pb, ¹⁴C)). D3 Assessment of the past contamination levels: Interface cores from the Sète Canyon will be used for contaminant analysis.	1,2,4 1,4 4
E Modelling	E1 Model development: Implementation on the sediment transport model (SYMPHONIE) of a module allowing to determine the pollutants (metals, radionuclides) concentration and translocation during extreme events. E2 Validation: It will go on first on winter 2004-2005 marked by intense dense water formation and cascading events and then on extreme events which will be documented during the project, based on observations collected on prodeltas and at the canyons moorings (FRAME, OPERA, POEM platforms/instrumentations and recirculating flume experiments). E3 Simulation analysis: A cartography of sediment and pollutants translocation will be established showing the erosion and deposition areas at the end of the events (continent, shelf sediment and deep basin). E4 Evolution of extreme event-related transfer of pollutants in the coming decades: Use as forcings of the high resolution coastal simulation the outputs of the regional ocean (OPA) and atmosphere (ARPEGE) climate models from Météo-France that provided a simulation over the 1960-2099 period using the A2 scenario of IPCC.	5 1,2,3,4,5 1,2,3,4,5 2,5

Tableau 1 : Description des thèmes et des actions programmés et partenaires impliqués (1 : IRSN ; 2 : CEFREM ; 3 : CEREGE ; 4 : IFREMER ; 5 : LA) ; les actions ou parties d'action rayées correspondent à des actions programmées lors de la soumission du projet mais non poursuivies : Les justificatifs scientifiques et/ou techniques ont été présentés dans les différents rapports d'avancement.

Thèmes	Actions	Partenaires impliqués	Durée (janvier 2007-juin 2011)																	
			2007			2008			2009			2010			2011					
A	A1	1,2,3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0	0	0	P	P
	A2	1,2,3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			P	P
	A3	1,2,3		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				P	P
B	B1	1,2,3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	+	+	P	P
	B2	1,2,3		x	x	x	x		0	0	+	0	+	+	+	0	0	P	P	
	B3	1,2,3																		
	B4	1,2,3		x		x		x		x		x		0					P	P
	B5	1,2,3												x					P	P
C	C1	1,2,3	x	x	x	x	x	x	x	x	+	+	+	+	0	0			P	P
	C2	2,4				x	x			0	0		0		0	0	0	0	P	P
	C3	2,4		x	x	x	x	x	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0	P	P
	C4	1,2,3,4		x		x		x		x		x		0				0	P	P
D	D1	1,2,4		x	x		x	x		x	x		x	x		0		0	P	P
	D2	1,4		x	x	x	x	x		0	0		0		0		0	0	P	P
	D3	4		x	x	x	x	x		0	0		0		0		0	0	P	P
E	E1	5	x	x	x	x													P	P
	E2	1,2,3,4,5					x	x	x	x									P	P
	E3	1,2,3,4,5								x	x	x	x						P	P
	E4	2,5													x	x	x	x	x	P
Réunion des partenaires			x		x		x		x		x		x		x				P	P
Livrables			xx		xx		xx		xx		xx		xx		xx		xx		P	xx

xx rapport intermédiaire
 xxx rapport final
 x programmé
 x réalisé
 x retardé
 annulé
 0 nouvelle prévision
 P Prolongation

Tableau 2 : Synthèse des principales tâches et livrables du projet qui ont été définis lors du démarrage du projet par le consortium et état d'avancement en fin de contrat (juin 2011), soit 54 mois après le lancement du projet.

2.2 DATES DES REUNIONS (LANCEMENT, ANNUELLE, CLOTURE) DU PROJET

Entre janvier 2007 et juin 2011, le projet a été soutenu par 1 réunion de lancement, 4 réunions d'avancement regroupant l'ensemble des partenaires et 3 ateliers thématiques. Le colloque de restitution finale s'est déroulé les 4 et 5 mai 2011.

En termes de bilan, le projet compte ainsi 13 journées d'échanges et de restitution. Les dates et thématiques de ces différentes journées, rappelées lors des journées de clôture sont indiquées ci-dessous.



EXTREMA Bilan--Réunions--Livrables

Réunion de lancement, 21 **février 2007** à l'IRSN Cadarache

Réunion d'avancement à 6 mois, 15 **juin 2007** au CEREGE, L'Arbois

Séminaire 7 et 8 **février 2008** au CEFREM, Perpignan

Réunion d'avancement les 6 et 7 **novembre 2008** à l'IRSN, La Seyne sur mer

Réunion plénière les 4 et 5 **février 2010** au POC LA, Toulouse

GT Fleuves, 28 mai 2009 au CEREGE, L'Arbois

GT Atmosphérique, 9 octobre 2009, IRSN IFREMER La Seyne sur mer

GT Prodelta, 3 février 2010, POC Toulouse

7 Rapports d'avancement semestriels

... Colloque de restitution finale les 4 et 5 mai 2011 ...

Colloque de restitution final ANR EXTREMA - 4 et 5 Mai 2011 - Château de Cadarache



21/26

2.3 TAUX D'AVANCEMENT DE L'ENSEMBLE DU PROJET (OPTIONNEL)

En termes d'avancement et de réalisation, il apparaît que les objectifs fixés ont été atteints malgré les contraintes inhérentes aux expérimentations de terrain (moyens à la mer, déploiements d'observatoires dans des zones d'interface, capture d'épisodes paroxystiques, moyens et délais analytiques). Des actions complémentaires apportant une plus value significative au projet ont été initiées en cours de projet sur des fonds annexes par les différentes équipes. Ces actions ont été régulièrement rapportées au sein des différents rapports d'avancement (cf paragraphe 2.6.8).

En termes de bilan, EXTREMA a également permis de mettre en exergue des compartiments, mécanismes, facteurs ou paramètres originaux et paraissant jouer un rôle significatif dans le transfert

des contaminants. Ces points clés sont soulignés plus avant dans le rapport scientifique. EXTREMA est ainsi source de perspectives et nouvelles actions de recherches dont certaines ont déjà été initiées (transfert des contaminants associé aux incendies de forêts, transfert des contaminants des marges alluviales vers les rivières (réalimentation), transfert vers la chaîne trophique (spéciation), forçages anthropiques (dragages, chasses), monitoring adapté pour la quantification des flux, identification et caractérisation des origines des masses sédimentaires, quantification des flux nets/flux bruts, projets de recherches dédiés aux processus de transfert des contaminants en milieu côtier sur le site de Fukushima (Japon)).

3 RAPPORT FACTUEL

Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux. Il est constitué de deux ensembles de tableaux et de deux listes rassemblant des indicateurs quantitatifs, bibliométriques et de personnel.

3.1 TABLEAU DE RESULTATS

Il décompte divers éléments de bilan comme indiqué ci-dessous

3.1.1 NOMBRE DE PUBLICATIONS

	International		France		Actions de diffusion		
	Articles acceptés dans des revues à comité de lecture	Communications Internationales	Articles France	Communications France	Articles vulgarisation	Conférences vulgarisation	Autres
Monopartenaires	7	4	2	5	10	5	Sites web
Multipartenaires	14	11	0	3	2	2	Sites web

3.1.2 AUTRES RETOMBÉES

Ce tableau dénombre les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels.

Nature	Commentaire
Brevets nationaux	-
Brevets internationaux	-
Autres	Se reporter au paragraphe 3.4

3.2 TABLEAU DE PERSONNELS

Il fait le point sur les emplois mis en jeu et consécutifs au projet.

	nombre de personnes employées en CDD sur le projet et financées par l'ANR	
	nombre	Mois-homme cumulés sur tous les partenaires depuis le début du projet
Doctorants	0	0
Post-doctorants	3	33
Ingénieurs d'Etudes (CDD)	0	0
Techniciens et assistants scientifiques (CDD)	6	64,35

Nom, prénom, qualification	Devenir des personnes employées en CDD sur le projet		
	emploi suite au projet		en recherche d'emploi
	chez les partenaires	ailleurs	
Ferrand Emmanuelle, post doctorant	CDD IRSN		
Raccasi Guillaume, post doctorant	CDD CEREGE		
Castelle sabine, post doctorant			En master information géographique
Jasmin Bérangère, technicienne		oui	
Jaudon Vincent, technicien			oui
Auger Pierre-Amaël, assistant scientifique	CDD LA		
Pepin Emilie, assistant scientifique	CDD LA		
Sotin Christine, assistante scientifique	CDI CEFREM		
Gueneugues Audrey, assistante scientifique		CDI OBS Banyuls	

3.3 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

La liste des publications et communications répertorie les productions résultant des travaux effectués dans le cadre du projet. On suivra les catégories du tableau de résultats (3.1.1) en suivant les normes éditoriales habituelles de présentation des publications et brevets. En ce qui concerne les conférences, sont spécifiées les conférences invitées.

3.3.1 ARTICLES MULTIPARTENAIRES

- 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-Poulitchet F., Dezileau L., Freydisier 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*, 45, 8642-8647.
- Eyrolle F., Radakovitch O., Raimbault P., Antonelli C., Ferrand E., Raccasi G., Aubert D., Gurriaran R., Long term survey of suspended sediment and associated natural and artificial radionuclides transport in the Rhône River (south eastern France), *journal of soil and sediments*, 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), *Geochemica 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., 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., 2010a, 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., 2010b, 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.
- 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., Thébault H., 2011, Marine Ecosystems Responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean, *Progress in Oceanography*, 91, 97-166.
- Palanques A., Puig, J., Guillén, X., Durrieu de Madron, M., Latasa, R., Scharek, J., Martin (2011) Effects of storm events on the shelf-to-basin sediment transport in the southwestern end of the Gulf of Lions (Northwestern Mediterranean). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1-8.
- 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.
- Puig P., Durrieu de Madron X., Salat J., Schroeder K., Martín J., Karageorgis A., Palanques A., Roullier F., Lopez-Jurado J.L., Emelianov M., Moutin T., Houpert L. Thick bottom nepheloid layers in the western Mediterranean generated by deep dense shelf water cascading. *Progress in Oceanography* (soumis).

3.3.2 ARTICLES MONOPARTENAIRES

- 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 paroxystic meteo climatic events on the translocation of contaminants within the geosphere, *Radioprotection*, vol.44, N°5, 463-468.
- 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.
- 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*.
- 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.
- Poizot E., K. Beryounia,, M. Chaïbi, A. Murat, G.M. Maillet et Y. Méar, 2011, Optimisation de la méthode GSTA (Grain Size Trend Analysis) par son intégration dans une approche Géomatique, *revue Paralia*, MEDDLT Editions.

3.3.3 OUVRAGES, CHAPITRES D'OUVRAGE

- 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.

3.3.4 CONFERENCES NATIONALES

- 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 durance 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.
- Michaud H., Leredde Y., Marsaleix P., Estournel C., Arduin F., 2011, Wave-induced current in a 3D circulation model, Colloque EPIGRAM 2011, Ile de Ré, 30 Mai au 1er Juin 2011.
- 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., Lebrevre 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.
- Stabholz M., Durrieu de Madron X., Kerhervé P., Sotin C., Jeanty G. and Heussner S., 2011. Impact of dense water formation events on deep marine sediments : spatial heterogeneity versus temporal variability. EGU General Assembly 2011, Vienna. Geophysical Research Abstracts, 13, EGU2011-10655-1.

3.3.5 CONFERENCES 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., Métails 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., Provansal M., Villiet J., Raccasi G., Radakovitch O., Gurriaran R., Antonelli C., 2008 a, 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., 2010a, 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., 2008b, 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., 2008, 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.

3.3.6 PRESENTATIONS SUR POSTER

- Eyrolle F., Antonelli C., Raimbault P., Boullier V., Arnaud M., 2010b, SORA: a high frequency flux monitoring station at the lower Rhône River, proceedings of the 39th CIESM Congress, Venice, Italy, 10 - 14 May 2010.

3.3.7 DIFFUSION-VULGARISATION

- Antonelli C. and Co, 2009, Journée du Pôle de compétitivité Gestion des Risques et Vulnérabilité des territoires, ANR EXTREMA, 1^{er} décembre 2009, Aix en Provence.
- 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.
- 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, **Dossier déposé en réponse à l'AAP ANR émis le 9 juin 2006**, Rapport DEI/SESURE 2007-40.
- 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 ; 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 ; 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 ; 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.
- Eyrolle et al ; 2010, 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 2009**, Rapport DEI/SESURE 2010-17.
- Eyrolle et al ; 2010, 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 2010**, Rapport DEI/SESURE 2010-27.
- Eyrolle et al ; 2011, 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, **Colloque de restitution finale**, Compilation des actes du colloque, Rapport DEI/SESURE 2011-24.
- Eyrolle F. and Co, 2007, CHACCRA Annual Workshop Banyuls sur mer, ANR EXTREMA, 6-7 décembre 2007.
- Eyrolle F. and Co, 2007, Vulnérabilité: Milieux, climat et sociétés - Séminaire d'avancement mi-parcours de l'Edition 2006, ANR EXTREMA, 17 et 18 novembre 2008.
- Eyrolle F. and Co, 2007, Vulnérabilité: Milieux, climat et sociétés - Séminaire d'avancement mi-parcours de l'Edition 2006, ANR EXTREMA, 17 et 18 novembre 2008.
- Eyrolle F. and Co, 2011, Séminaire ANR « Changements environnementaux », ANR EXTREMA, 22-23-24 Mars 2011, SupAgro Montpellier.
- Eyrolle F., 2010, Que deviennent les particules lors d'évènements climatiques extrêmes dans le Golfe du Lion ? AKTIS L'actualité de la recherche à l'IRSN, N°6 - octobre-décembre 2011.
- 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., Desmet M., Babut M., Bravard J.P., Bonté P., Dufours S., Eyrolle F., Ferrand E., Lebreuve 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.
- 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.
- Web site ; Mise en ligne des documents du projet EXTREMA : <http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Organisation/Programmes/EXTREME/EXTREMA/Pages/Le-projet-EXTREMA-3429.aspx>.

3.3.8 THESES SOUTENUES, OU EN COURS

3.3.8.1 Financées par l'ANR

Aucune thèse n'a été financée sur ce projet au profit de contrats de post doctorat (cf 3.3.8)

3.3.8.2 Non financées par l'ANR mais directement liées 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 ISRN/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 ISRN/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.

3.3.9 POST DOCTORAT FINANCES PAR L'ANR

CASTELLE Sabine, 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-005-04, 2007-2011), Rapport final de post doctorat IFREMER.

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-005-01, 2007-2011), Rapport de Post Doctorat IRSN, Rapport DEI/SESURE 2010-02.

RACCASI Guillaume, 2010, 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, Contribution au projet ANR EXTREMA (contrat N° ANR-06-VULN-005-03, 2007-2011).

3.4 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

La liste des éléments de valorisation inventorie les items suivants :

- brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet.
- logiciels et tout autre prototype
- actions de normalisation
- les conséquences du projet (lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...)
- le développement d'un nouveau partenariat,
- la création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté
- autres (ouverture internationale,...)

3.4.1 CONSEQUENCES DU PROJET (LANCEMENT DE PRODUIT OU SERVICE, NOUVEAU PROJET, CONTRAT,...)

OSR - Observatoire des Sédiments du Rhône (ZABR)

Les actions réalisées dans le cadre d'EXTREMA ont permis de soutenir les orientations de recherches avancées dans l'Observatoire des Sédiments du Rhône (Observatoire de la ZABR, Zone Atelier du Bassin Rhodanien, <http://www.graie.org/osr>). Ainsi, des travaux de recherches concernant le stockage des contaminants au sein des annexes fluviales, l'impact des chasses ou des opérations de dragages sur le transfert de matière amont/aval et sur la qualité des eaux, le développement d'outil et de méthodologie afin de rendre compte de l'origine des particules vecteurs de polluants, ainsi que le renforcement du réseau de mesure des matières en suspension à l'échelle du bassin versant sont inscrits au triennal OSR 2010-2013. L'OSR est soutenu financièrement par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, la région Rhône Alpes, la région Provence Alpes Côte d'Azur, la région Languedoc Roussillon, la Compagnie Nationale du Rhône et l'Union Européenne (UE POP FEDER).

RHOSOS

Dans la continuité des travaux de recherches développés dans le cadre des changements environnementaux et climatiques, le projet RHOSOS (RHOne SOurce to Sink) a été soumis à l'ANR début 2011 (Programme blanc, SIMI 5-6, Environnement, Terre et Espace). Ce projet a été élaboré par la plupart des équipes impliquées dans EXTREMA (IFREMER-GM, CEFREM, CEREGE, IRSN) en association avec le LSCE et l'UMR 6538 (Laboratoire Domaine Océaniques). L'ANR RHOSOS 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...).

Convention IRSN/CNR pour l'acquisition des débits liquides du Rhône

Un accord de collaboration entre l'IRSN et la CNR (Compagnie Générale du Rhône) a été établi dès le démarrage d'EXTREMA afin de disposer sur la période du projet des données relatives aux débits liquides du Rhône à la station de mesure d'Arles ainsi que des débits des affluents lors des principales crues. Les données de débits horaires et journaliers ont ainsi alimenté quotidiennement le site ftp d'échange du projet.

Groupe de Travail PCB du Rhône

Les travaux réalisés dans le cadre du projet, notamment sur les stockages de sédiments fins et de radionucléides artificiels dans certaine typologie de marges alluviales de la partie terminale du Rhône, ont été mis à profit au cours des réunions du groupe de travail « PCB du Rhône » auquel l'IRSN a participé dès 2007.

3.4.2 DEVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU PARTENARIAT

ANR - CHACCRA (2007-2010)

Le projet CHACCRA du programme ANR VMC 2006, piloté par le CEA-LSCE, Gif sur Yvette, avait pour objectif de modéliser le cycle et les flux du carbone à l'interface fleuve - mer côtière et d'étudier la sensibilité au changement climatique. De multiples échanges de données (débits liquides du Rhône, charge en matières en suspension mesurées par la station SORA de l'IRSN) et de moyens (notamment les moyens à la mer) entre les équipes CHACCRA et EXTREMA ont apporté une plus-value incontestable aux deux projets.

3.4.3 CREATION DE PLATE-FORME A LA DISPOSITION D'UNE COMMUNAUTE

MISTRALS (Mediterranean Integrated STudies at Regional And Local Scales) - MERMEX:

Les thématiques de recherches d'EXTREMA ont alimenté le programme MERMEX, en particulier le chapitre sur les forçages météo climatiques et leurs conséquences sur les dynamiques sédimentaires et la redistribution des polluants. Ce travail de réflexion mené par le 'Groupe MERMEX' incluant les différentes équipes rattachées à EXTREMA a permis de produire un document conséquent publié en septembre 2010 dans Progress in Oceanography (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 PL., Thébaud H., 2011, Marine Ecosystems Responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean, Progress in Oceanography, 91, 97-166).

MISTRALS (Mediterranean Integrated STudies at Regional And Local Scales) - CHARMEX:

Les données (dépôts, radioactivité) acquises sur les stations de collecte d'échantillons atmosphériques (aérosols et pluie) à La Seyne-sur-Mer et Bonifacio, serviront à alimenter les WP « sources et dépôts » et « tendances et variabilité » du programme Charmex inclus dans le projet interdisciplinaire MISTRALS (Mediterranean Integrated STudies at Regional And Local Scales).

SOERE MOOSE (Mediterranean Ocean Observing System on Environment)

Le SOERE² MOOSE s'appuie sur les Observatoires de Sciences de l'Univers méditerranéens (Banyuls, Marseille et Villefranche) et différents partenaires dont 4 des partenaires d'EXTREMA (CEREGE, Univ. Marseille, IFREMER, CEFREM) dans le but de pérenniser les séries temporelles et d'harmoniser les

² Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement

stratégies d'observations entre les laboratoires à l'aide de moyens de mesures modernes et automatisés. Ce renforcement de l'observation couplée océan-atmosphère est notamment à l'origine de la pérennisation des mouillages profonds, du développement de certaines stations de mesure des apports atmosphériques (Cap Béar) et de la mise en œuvre des gliders (planeurs sous-marins) dans cette zone.

BARCARIN (Instrumentation du Bac de Barcarin)

Les mesures en flux de l'ANR EXTREMA ont permis de mieux connaître le déplacement sédimentaire des particules. Cette connaissance s'est avérée utile pour la mise en place d'un ADCP (courantomètre) tracté implanté sur le Bac de Barcarin. Cet appareil, financé par l'Observatoire des Sédiments du Rhône, permettra de suivre en continu et à chaque passage du Bac les écoulements liquides et solides (uniquement la charge en suspension) du Rhône à proximité de l'embouchure. Cette nouvelle plateforme instrumentée permettra d'évaluer le devenir des flux solides et des contaminants associés mesurés au niveau de SORA dans la zone d'interface eau douce - eau de mer. Cette station permettra ainsi à terme d'évaluer les flux « nets » à la mer, en compléments des flux « bruts » mesurés par SORA (fermeture du bassin versant), et d'étudier les processus de transferts de contaminants au sein des zones de réactivité estuarienne.

MESURHO

En complément de la station SORA, située à 40 km de la mer, le projet MESURHO (cofinancé par la région PACA) a été élaboré courant 2008 afin d'acquérir des mesures avec des capteurs aériens, de subsurface et de fond dans la zone d'embouchure du Rhône. Les partenaires scientifiques souhaitaient en effet s'appuyer sur une plateforme de type BFI (Bouée à Flotteur Immergé), de la Subdivision des Phares et Balises Ouest méditerranée (SPBOM), compte-tenu des contraintes environnementales difficiles inhérentes à la zone (exposition à la houle, aux crues du Rhône, secteur de chalutage). Une convention de collaboration entre la SPBOM et des partenaires scientifiques dont la plupart des équipes impliquées dans EXTREMA a été établie en janvier 2009.

EQUIPEX

EXTREMA a mis en lumière la difficulté, pour les laboratoires travaillant sur la façade méditerranéenne dans le domaine de l'océanographie, d'accéder à des moyens analytiques de pointe. Aussi, dans le cadre des appels à projets des équipements d'excellence par l'ANR (EQUIPEX), l'Université de Perpignan (porteur du projet) a soumis un dossier proposant l'acquisition de 2 ICP-MS. Ceci pourrait permettre à la communauté océanographique (partenaires MOOSE par exemple qui ne disposent actuellement d'aucun équipement pour l'analyse élémentaire des éléments traces) mais aussi à d'autres disciplines, de voir leur potentiel analytique accru.

3.4.4 - AUTRES (OUVERTURE INTERNATIONALE,..)

STAR (Strategy for Allied Radioecology)

Lancé en février 2011, le réseau d'excellence STAR, coordonné par l'IRSN, regroupe neuf partenaires européens. L'objectif est de mutualiser la connaissance, les infrastructures ainsi que les efforts de recherches des différents partenaires afin de créer une aire européenne de recherche en radioécologie. L'un des objectifs principaux de STAR est en particulier de construire un agenda stratégique de recherche sur 15 ans qui intègre également les besoins exprimés au-delà du consortium. Dans ce cadre, une partie des perspectives de recherches associées à l'étude des transferts des radionucléides dans l'environnement intègre la notion de changements environnementaux et climatiques (extension des échelles de temps et d'espace) sur la base, en outre, des actions de recherches développées dans le cadre d'EXTREMA.

Accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi

EXTREMA a permis de renforcer les liens avec le Laboratoire d'Aérodynamique de Toulouse et la plateforme SIROCCO impliquée dans l'étude d'impact des rejets radioactifs sur le milieu marin consécutifs à l'accident nucléaire de Fukushima-Daiichi. Par ailleurs, le déploiement des observatoires à l'échelle du système côtier du Golfe du Lion dans des zones stratégiques et le couplage données/modèles afin d'évaluer le transfert et la dynamique des flux à différentes échelles spatiale et temporelle,

permettent de conforter cette approche environnementale qui pourrait être pour partie appliquée aux systèmes côtiers du Japon.

4 RAPPORT SCIENTIFIQUE

4.1 RESUME CONSOLIDE

Français (1/2 page)

Le projet EXTREMA coordonné par l'IRSN a été élaboré en multipartenariat en réponse à l'AAP de l'ANR émis en juin 2006 sur son programme VMC « Vulnérabilité Milieu et Climat »³. Il avait pour objectif d'acquérir des données à l'échelle du Golfe du Lion, depuis les bassins versants des fleuves côtiers du pourtour de la méditerranée Nord occidentale jusqu'aux canyons du milieu sous marin profond en marge du plateau continental, afin d'enregistrer les flux de matières et les flux de contaminants lors d'épisodes météo climatiques de grande ampleur. En effet, les travaux antérieurs des différentes équipes avaient souligné l'importance des événements extrêmes dans le déplacement et le transfert des masses au sein des différents compartiments de la biogéosphère, ainsi que le poids de ces forçages dans les bilans matières réalisés à différentes échelles spatio-temporelles (MERMEX group, 2011). Le système côtier du Golfe du Lion a été choisi en raison de sa vulnérabilité à la fois aux épisodes météo climatiques de grande amplitude (poussière d'origine saharienne, crues du Rhône, tempêtes, épisodes de coulées d'eau dense (cascading) et convection au large) et aux sources de pollutions (radioactivité d'origine artificielle, métaux traces, composés organiques persistants). La mise en place et la consolidation d'observatoires en des points stratégiques du Golfe du Lion ont permis d'acquérir des données clés dans la compréhension des processus de transfert associés à ces épisodes extrêmes et pour le développement, la validation et l'utilisation de modèles hydro sédimentaires à différentes échelles d'espace et de temps (prodeltas/bassin méditerranéen occidental, évènementiel/inter annuel). Ce rapport présente de manière synthétique, tel que demandé par l'ANR, les principaux résultats marquants du projet. Au terme du projet, les transferts de matière et de contaminants associés aux forçages climatiques prédéfinis ou à des forçages anthropiques (lâchers de barrages) ont été évalués. Les différents vecteurs de transfert inter compartiments et les dynamiques des principaux milieux d'accumulation (puits) ou d'alimentation (sources) tels que les poussières atmosphériques, les marges alluviales et dépôts d'inondation, les prodeltas et les canyons du milieu marin profond ont été caractérisés. Nos travaux ont permis de mettre en évidence qu'une modification significative à plus ou moins long terme de la distribution des polluants au sein de certains systèmes côtiers pourrait être liée à la réduction du cascading et de la convection. Une des conséquences majeures de ce changement abrupt serait une séquestration des polluants au niveau des plateaux continentaux, lieux privilégiés de la production primaire et siège de développement des ressources marines.

Abstract (1/2 page)

The EXTREMA project, coordinated by IRSN, was developed in response to the ANR proposals issued in June 2006, on its program " Vulnérabilité Milieu et Climat » (VMC). The objectives of EXTREMA were to acquire data to record the flow of materials and contaminants during episodes of large-scale climate extremes. Data were collected across the Gulf of Lions, from the coastal river watersheds bordering the Mediterranean to the North Western submarine canyons in the middle deep margin of the continental shelf. Indeed, previous works performed by the various teams have stressed the importance of extreme events in the movement and transfer of masses in the different compartments of the biogeosphere, and the weight of these stressors in the mass balances conducted at different spatial and temporal scales (MERMEX Group, 2011). The coastal system of the Gulf of Lions was chosen because of its vulnerability to weather extremes, characterised by episodes of large amplitude (dust of Saharan origin, Rhone floods, storms), periods of dense water flows (cascading and convection), and sources of pollution (artificial radioactivity, trace metals, persistent organic compounds). The establishment and consolidation of observatories at strategic points in the Gulf of Lion allowed the gain of key information for understanding the transfer processes associated with these extreme events, and the development, validation and use of sedimentary hydro models at different scales of space and time (prodelta / Western Mediterranean basin, events / inter annual). This report summarizes, as requested by ANR, the significant results of the project. At the end of the project, mass transfers of contaminants associated with climate forcings or anthropogenic forcings (dam releases) were evaluated. The various inter-compartment major transfer vectors were identified. The mass dynamics of the major media acting as sinks (accumulation) and/or sources (supply) such as atmospheric dust, margins and alluvial deposits of flooding, prodeltas and deep canyons of the marine environment have been characterized. Our work has highlighted that a significant change in the longer term the distribution of anthropogenic pollutants in some coastal systems might be related to the reduction of cascading and convection. A major consequence of this abrupt change would be a sequestration of pollutants at the continental shelves, privileged places of primary production and head of development of marine resources.

³ Actuellement, et depuis 2008, ce programme est devenu le programme VMCS « Vulnérabilité Milieu Climat et Société ».

4.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Préciser (2 pages maxi)

L'environnement est soumis à des perturbations d'origine naturelle ou anthropique, induites à des échelles de temps et d'espace variables, pouvant conduire à des changements drastiques, et en particulier à des déséquilibres irréversibles lorsque le seuil de résilience du système est dépassé. Face à cette perception du risque, la connaissance approfondie à la fois des sources de déséquilibres et de leurs conséquences est une demande sociétale toujours croissante. Cette connaissance approfondie du risque et de ses conséquences est formulée de manière de plus en plus accentuée dans le cadre du changement climatique.

Des programmes de recherches de grande ampleur identifient les aléas climatiques, c'est-à-dire les épisodes météo climatiques extrêmes, à la fois comme une manifestation du changement global et comme responsables de déséquilibres majeurs (GEWEX, IGPB, GICC, IMFREX). Ainsi, par exemple, le programme français IMFREX met en avant une augmentation des précipitations intenses en hiver dans le nord de la France, une recrudescence généralisée des crues en hiver et au printemps et une amplification des épisodes de sécheresse dans le sud (Houghton et al., 2001).

Dans ce contexte, les environnements côtiers, incluant les fleuves côtiers et leur bassin versant, les zones d'interfaces continent/océan et le milieu marin depuis les littoraux jusqu'aux pieds des marges des plateaux continentaux constituent des systèmes particulièrement vulnérables au changement du climat. Ainsi, au cours de la dernière décennie, plusieurs programmes de recherches régionaux, nationaux et internationaux ont été consacrés à l'étude du devenir des apports terrigènes délivrés par les rivières au milieu marin. Il s'agissait de caractériser les dynamiques de transfert des flux solides et des flux de nutriments ou de contaminants associés en identifiant les processus de dépôt et d'érosion (e.g., ORME, PNEC, CARMA, EUROSTRATAFORM). Ces programmes, ciblés notamment sur le Golfe du Lion, ont souligné les lacunes de connaissances quant aux conséquences des épisodes météo climatiques extrêmes, tels que les crues ou les tempêtes, sur les transferts de matière et la redistribution des polluants, et la nécessité de prendre en compte ces événements pour évaluer la vulnérabilité des environnements côtier au changement global.

Le système côtier du Golfe du Lion constitue un site atelier particulièrement adapté à cette thématique de recherches. Son plateau continental est l'un des plus vastes de Méditerranée. Il présente une exceptionnelle productivité biologique et contient des ressources halieutiques considérables. Il est alimenté par des apports terrigènes conséquents délivrés en grande partie par le Rhône mais aussi par les petits fleuves côtiers, principalement lors des crues éclaircies caractérisant. C'est en outre l'un des rares endroits de Méditerranée où l'on observe des formations d'eau dense et froide, à l'origine des épisodes de convection et de cascading (Durieu de Madron et al., 2000). On soupçonne ces épisodes, dont l'occurrence et l'amplitude sont particulièrement sensibles au changement du climat, de déplacer les sédiments à grande échelle, en particulier à l'échelle du Golfe du Lion (Béthoux et al., 2002; Dufau-Julliand et al., 2004; Canals et al., 2006; Ulses et al., 2008). Le système est également largement soumis aux retombées atmosphériques de poussières sahariennes. Ces épisodes induisent une augmentation de la concentration en aérosols dans l'air et généralement de la teneur en contaminants (Avila et al., 1998). Ils peuvent conduire par exemple en quelques heures à des dépôts de radioactivité équivalents à ceux cumulés sur plusieurs mois voire plusieurs années (Masson et al., 2005). Par ailleurs, le Rhône constitue historiquement un terme source considérable de contaminants pour le système côtier du Golfe du Lion, en particulier pour les composés organiques persistants (PCB, Lindane, composés bromés), les éléments traces métalliques (Roussiez et al., 2005; Radakovitch et al., 2008) et les radionucléides artificiels (Thomas, 1996 ; Charmasson, 1998 ; Rolland, 2006 ; Rolland et al., 2004a, 2004b ; Eyrolle et al., 2008c). Le Rhône est en outre le fleuve où l'industrie nucléaire française s'est implantée dès 1955, en particulier avec l'établissement COGEMA de Marcoule en charge à l'époque notamment de la production de plutonium et de tritium et, jusqu'en 1997, du retraitement de combustibles usagés. Il est l'un des fleuves le plus nucléarisé au monde. Actuellement, et depuis le début des années quatre vingt, il soutient la production de 13400 MWe au moyen de quatre centres nucléaires de production d'électricité (Bugey, Saint Alban-Saint Maurice, Cruas et Tricastin). Le Rhône a été ainsi le réceptacle, au cours de près de soixante ans, des effluents liquides de faible radioactivité émis par les différentes installations nucléaires rhodaniennes. Les réglementations ou recommandations en matière de protection de l'environnement mises en place à partir du début des années 1990 ont conduit à une diminution significative des quantités de polluants rejetées dans l'environnement, notamment ceux générés en masse lors de l'essor industriel (milieu du siècle dernier). Toutefois, le rôle considérable des compartiments de stockage dans la réalimentation

des flux de polluants a été démontré (e.g., Wiit and Siegel, 2000 ; Williamson et al., 1996), en particulier pour les radionucléides présents dans les stocks sédimentaires du milieu marin ou continental (Vives i Battle, 1993 ; Cook et al., 1997 ; Charmasson et al., 1998 ; Arnaud et al., 2003 ; Charmasson, 2003 ; Antonelli et al., 2008 ; Eyrolle et al., 2004 b, 2006 ; Maillet, 2006). Ces compartiments puits entretiennent la rémanence des contaminants en certains points d'accumulation et agissent comme des termes sources secondaires ou différées de polluants lors des forçages météo climatiques. La connaissance du fonctionnement des différents termes sources à l'échelle d'un système côtier tel que le Golfe du Lion est un enjeu majeur afin d'évaluer la vulnérabilité à moyen et long terme de ces systèmes aux changements environnementaux et climatiques.

Dans ce cadre, le projet EXTREMA coordonné par l'IRSN a été élaboré en multipartenariat en réponse à l'AAP de l'ANR émis en juin 2006 sur son programme VMC « Vulnérabilité Milieu et Climat »⁴. Ce projet a regroupé les équipes de l'IRSN, du CEFREM (Centre de Formation et de Recherche sur l'Environnement Marin - UMR5110 CNRS UPVD), du CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement - UMR6635 CNRS Aix Marseille III), de l'IFREMER (centres de La Seyne-sur-Mer et Brest) et du LA (Laboratoire d'Aérodynamique UMR5560 CNRS Toulouse).

Il avait pour objectif d'acquérir des données à l'échelle du Golfe du Lion, depuis les bassins versants des fleuves côtiers du pourtour de la Méditerranée nord occidentale jusqu'aux canyons du milieu sous marin profond en marge du plateau continental, permettant d'évaluer les flux de matières et de contaminants associés lors d'épisodes météo-climatiques de grande ampleur. EXTREMA proposait sur la base d'observatoires déployés à large échelle d'identifier les forçages à l'origine de modifications drastiques des stocks et des flux de matière. Le projet avait pour ambition d'évaluer les conséquences des forçages d'origine météo-climatiques sur les transferts de matière, notamment sur la dispersion ou l'accumulation des polluants dans l'environnement en identifiant les principaux compartiments et milieux récepteurs (puits), émetteurs (sources) ou de transit (vecteurs). Sur cette base, il s'agissait d'identifier également les processus susceptibles d'induire à plus ou moins long terme des changements abrupts dans la distribution des polluants anthropiques dans l'environnement, c'est-à-dire les phénomènes de seuils pouvant conduire à des irréversibilités. L'un des enjeux majeur du projet était de coupler les données des observatoires avec les modèles hydro sédimentaires développés à l'échelle du Golfe du Lion (Estournel et al., 2000 ; 2003). Ces données devaient permettre tout d'abord la validation des modèles appliqués au transfert des contaminants, puis à partir de scénarios de changement climatique ou de scénarios de forçages climatiques d'évaluer à moyen et long termes l'évolution des distributions des contaminants à l'échelle du système côtier.

4.3 MATERIEL ET METHODES

Préciser (2 pages maxi)

Le système côtier du Golfe du Lion a été choisi en raison de sa vulnérabilité à la fois aux épisodes météo climatiques de grande amplitude (poussière d'origine saharienne, crues du Rhône, tempêtes, épisodes de coulées d'eau dense et convection au large) et aux sources de pollutions (radioactivité d'origine artificielle, métaux traces, composés organiques persistants). Dans le cadre d'EXTREMA, la mise en place ou la consolidation d'observatoires en des points stratégiques du Golfe du Lion afin d'acquérir des données à haute fréquence ainsi que le développement et l'utilisation de modèles hydro sédimentaires à différentes échelles spatiales (prodeltas/bassin méditerranéen occidental) ou temporelles (événementiel/inter annuel) ont constitué des outils majeurs.

4.3.1 Les observatoires et échantillons archives

EXTREMA s'est appuyé en partie sur des plateformes instrumentées ou des observatoires déjà existants mis en place par les différents partenaires du projet dans certains cas depuis plusieurs années. Dans le cadre du projet, ces outils ont été adaptés afin de permettre l'enregistrement des épisodes extrêmes, notamment par l'automatisation des prélèvements et des enregistrements, et par l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage ou de mesure. EXTREMA a également bénéficié d'échantillons archives collectés en particulier dans les berges et autres annexes fluviales du Rhône aval, le prodelta rhodanien, le canyon du Lacaze-Duthiers et le bassin profond.

⁴ Actuellement, et depuis 2008, ce programme est devenu le programme VMCS « Vulnérabilité Milieu Climat et Société ».

La [Figure 1](#) indique la localisation et les caractéristiques des différents outils d'acquisition de données exploités au sein de la zone d'étude.

Dépôts atmosphériques : Les dépôts atmosphériques ont été caractérisés en partie Est (Cap Béar) et Ouest du Golfe du Lion (La Seyne-sur-Mer, Port Saint Louis du Rhône, Ile du Frioul à Marseille). Les systèmes d'observation du compartiment atmosphérique ont été dans certains cas redéfinis et ajustés afin de permettre une caractérisation des dépôts secs et des dépôts humides, et souligner l'influence industrielle sur les retombées atmosphériques en milieu côtier. Le projet a également bénéficié de la plateforme OPERA-air (Observatoire Permanent de la Radioactivité dans l'environnement) de l'IRSN déployée à l'échelle du territoire français.

Exports par les rivières : Les flux solides du Rhône et les contaminants ont été suivis au moyen de la station SORA de l'IRSN implantée à Arles. Les prélèvements automatisés de cette station permettent de réaliser des échantillons intégrés sur des pas de temps variables en fonction de l'hydrologie (régime de base ou occurrence de crue) ([Eyrolle et al., 2010a](#)). Des prélèvements ponctuels ont également été réalisés à partir de la station pour les éléments traces métalliques. A noter que les concentrations en matière en suspension ont été en grande partie mesurées par le Centre d'Océanologie de Marseille, en charge de ce paramètre pour le compte de l'Agence de l'eau RMC. Les flux solides du Rhône transférés par la charge de fond ont été évalués en aval de la station SORA par un suivi bathymétrique du lit du fleuve et l'utilisation de modèles numériques de terrain. Les flux solides des autres fleuves côtiers ont été suivis par le CEFREM lors de campagnes de prélèvements mensuelles.

Dépôts/érosion au débouché des fleuves : L'étude des dynamiques de transfert des masses sédimentaires au débouché du Rhône a été soutenue par l'instrumentation mise en place dès 2005 dans le cadre du projet interrégional PACA-Midi Pyrénées CARMA (2005-2007). Ce projet avait souligné la difficulté de maintenir des équipements, en particulier les ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) et les altimètres, dans ces zones particulièrement impactées par le chalutage. La plateforme MESURHO soutenue par une convention multipartenaires avec la subdivision Phares et balises ouest Méditerranée (cf 2.7.3) a permis, début 2009, d'installer et de maintenir des instruments de mesure de manière sécurisée sur une bouée fixe à flotteur immergé ([Cadiou et al., 2010](#)). Par ailleurs, un prototype de la station autonome FRAME, développée par IFREMER et permettant de déterminer les concentrations en éléments traces métalliques dans l'eau lors des remises en suspension événementielles, a été mouillé à proximité du débouché du Grand Rhône (baie de Marseille). Le débouché de la Têt a été suivi au moyen de la station POEM-LR2, à la charge du CEFREM. EXTREMA a également bénéficié des travaux ciblés sur l'érosion du littoral au débouché du Grand Rhône en relation avec les forçages fleuve/mer replacés dans un contexte historique.

Transfert plateau / domaine profond : Les transferts de masse du plateau continental vers le milieu marin profond via les canyons sous l'influence du cascading ont été suivis grâce à l'instrumentation (pièges à particules, courantomètres à 500 et 1000 m de profondeur) de lignes de mouillage aux extrémités orientale (canyon du Planier) et occidentale (canyon du Lacaze-Duthiers). Les flux de matière et l'influence de la convection profonde en mer ouverte ont été suivis dans la partie profonde du Golfe du Lion au débouché du réseau des canyons de l'ouest du Golfe du Lion à l'aide de mouillages instrumentés entre 2060 et 2350 m de profondeur.

4.3.2 Les campagnes océanographiques

Au cours du projet, 8 demandes de campagnes en mer ont été examinées (évaluation des demandes de moyens à la mer) et acceptées par le Comité Inter-Régional Méditerranée (CIRMED). Les campagnes ROUSTAN 1 (NO Haliotis), EXTREMA 1 et EXTREMA 2 (NO Europe), RHOSOS (NO Le Suroît), DEEP 1, 2, 3 et 4 (NO Europe et NO Tethys II) ont permis de collecter des échantillons d'eau, de matières en suspension et de sédiments au débouché du Rhône, d'instrumenter les lignes de mouillages au niveau des canyons et du bassin ainsi que de collecter des carottes sédimentaires en milieu marin profond. EXTREMA a également bénéficié de la mise à disposition d'échantillons prélevés lors des campagnes océanographiques réalisées dans le cadre du projet ANR-VMC-CHACCRA ainsi que de la collaboration de l'Université d'Angers (G. Maillet, BIAF).

4.3.3 Expérimentations en canal à courant

Les études de remises en suspension en canal à courant à partir de carottes sédimentaires du prodelta rhodanien, afin d'alimenter les paramètres du modèle hydro sédimentaire (tensions critiques d'érosion, granulométrie des particules resuspendues, teneurs en métaux par classes granulométriques) ont été réalisées en partenariat avec l'IRPHE (Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre, UMR 6594) et l'Ecole Nationale d'Ingénieurs ENI-ABT de Bamako.

4.3.4 Les modèles hydro sédimentaires

Les outils utilisés intègrent un modèle hydrodynamique, un modèle de vagues et un 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. Il s'agit du modèle SYMPHONIE développé par le Pôle Océanographie Côtière de Toulouse (http://poc.obs-mip.fr/pages/publications/publi_symphonie.htm).



Figure 1 : EXTREMA - Déploiement des observatoires à l'échelle du Golfe du Lion.

4.4 RESULTATS

Résultats et faits marquants (4 pages maxi)

4.4.1 Fréquence des épisodes météo climatiques extrêmes sur la zone côtière du Golfe du Lion -Tendances actuelles et attendues (synthèse des connaissances)

Poussières sahariennes : Le travail de synthèse réalisé à partir du modèle de prévisions d'empoussièrement développé par l'équipe de George Kallos de l'Université d'Athènes, indique que la fréquence de ces épisodes est en augmentation en France depuis 2000. Les données indiquent toutefois une grande variabilité interannuelle (> 100 %) du nombre de jours et du nombre d'épisodes d'une année à l'autre. La fréquence des épisodes de transport de poussières sahariennes enregistrées sur les stations du réseau OPERA-air varie au cours de l'année et présente un maximum au printemps. Cette variation intra-annuelle correspond à la saisonnalité des émissions des régions sources.

Hydrologie/crués/exports sédimentaires :

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. Le travail réalisé sur les principaux fleuves côtiers du Golfe du Lion (Tech, Têt, Agly, Aude, Orb et Hérault) a pu mettre en évidence une diminution significative des débits annuels depuis les années 1960, correspondant à une diminution de la ressource en eau de 20% environ pour la période 1965-2004 (Serrat et al., 2001 ; Ludwig et al., 2003, 2004 ; Lespinas et al., in prep). 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 s'expliquant 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. Une recrudescence des crues exceptionnelles du Rhône depuis le début des années 1990 est toutefois constatée (Raccasi, 2008). Boé et al. (2007) souligne également une amplification et une dérive de la saisonnalité se manifestant notamment par des étiages marqués se prolongeant jusqu'à l'automne et par des crues cévenoles hivernales (Ducharne et al., 2009).

Concernant les apports sédimentaires au Golfe du Lion par les fleuves, le travail de synthèse réalisé indique une légère tendance à la diminution des apports sédimentaires par les fleuves côtiers en comparaison avec les apports du Rhône, mais il témoigne 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. Pendant des années sèches, leur contribution aux apports totaux peut tomber en dessous de 1%. 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.

Tempêtes : Concernant les tempêtes impactant le Golfe du Lion, les conclusions du projet IMPLIT GICC, 2007 indiquent une augmentation des épisodes de mistral en hiver et des tempêtes au large.

Convection et Cascading : Les épisodes de plongées des eaux denses côtières exportées du plateau vers la pente continentale (cascading) et les épisodes de formation d'eaux denses au large et leur transfert vers le bassin profond (convection en mer ouverte) sont générés par le refroidissement et le mélange des eaux de surface sous l'action des vents de nord (Mistral) et nord-ouest (Tramontane). Les observations sur le cascading enregistrées dans le canyon du Lacaze-Duthiers depuis 1993 montrent une récurrence annuelle avec des paires d'années intenses (1999-2000, 2005-2006). La convection en mer ouverte présente également une récurrence annuelle avec des années de forte convection qui atteint le fond. Les intensités des processus de cascading et convection ont été concomitantes en 1999-

2000 et 2005-2006, mais leurs intensités respectives sont décorréées depuis. Trois épisodes de convection profonde ont été observés en 2009, 2010 et 2011 alors que l'intensité du cascading est restée faible à moyenne (Puig et al., soumis). Somot et al (2006) et Herrmann et al (2008) suggèrent à l'aide de simulations climatiques (scenario A2) que la fréquence des épisodes de fort cascading et convection diminuerait dans le futur du fait du réchauffement des eaux de surface de la mer Méditerranée.

4.4.2 Flux évènementiels de matière générés par les épisodes météo-climatiques intenses - Quantification et contribution/flux moyens

Poussières sahariennes et feux de biomasse:

Le nombre de jours de dépôt de **poussières sahariennes** dans le sud de la France est en moyenne de 40 par an. Lors de ces épisodes, le flux moyen de particules peut atteindre $12 \text{ g.m}^{-2}.\text{mois}^{-1}$, soit environ douze fois plus que ceux observés habituellement. L'activité volumique en ^{137}Cs dans l'air est quant à elle multipliée par un facteur 2 à 4. L'export (enlèvement) total en ^{137}Cs par ces événements est estimé entre 10^{11} et 10^{13} Bq par an, à mettre en perspective par exemple avec les quantités exportées annuellement par le Rhône, de l'ordre de 10^{11} Bq par an. A l'échelle du Golfe du Lion, le flux de dépôt associé à ces épisodes correspondrait à moins de 1% des quantités apportées par le Rhône. A noter également qu'à l'échelle de la France, le dépôt annuel de ^{137}Cs associé à ces événements est inférieur à 1 Bq.m^{-2} , soit une contribution inférieure à 1 % des dépôts atmosphériques antérieurs rémanents (Masson et al., 2010).

Par ailleurs, les **incendies de forêts** en 2002 dans l'est de l'Europe ont conduit à transporter des particules porteuses de ^{137}Cs sur de très grandes distances et ont entraîné des augmentations significatives des niveaux d'activité en ^{137}Cs à plusieurs milliers de kilomètres. Le suivi de ces épisodes de grande ampleur indique que 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 (Masson O. et al., 2009 ; Piga et al., 2010).

Concernant les éléments stables majeurs et traces métalliques, nous soulignons que dans la région Marseillaise, la présence de **sources émettrices différentes**, incluant des sources anthropiques, est très probablement à l'origine de la variabilité spatiale et temporelle des teneurs et du comportement des éléments dans les dépôts. Plus à l'ouest, sur le site du Cap Béar, les analyses indiquent une origine principalement crustale pour l'ensemble des éléments étudiés (Ni, V, Cr, Mn, Ti, As, Pb, Cu, Cd, Zn et Al), et une contribution anthropique limitée. Dans la grande majorité des cas, les flux de dépôts atmosphériques semblent être liés à des « pulses » d'apports ayant probablement comme vecteur les **poussières sahariennes**. A noter que les flux déterminés sur la période 2007-2009 au cap Béar sont significativement plus faibles, d'un facteur 2 à 4, que ceux déterminés par Guieu et al. (1997 ; 2010) pour la période 2001-2002 sur le même site.

Les concentrations en mercure total dans les retombées humides, en mercure gazeux total et en mercure total dans les aérosols ont été suivies à La Seyne-sur-Mer. Les concentrations en mercure total gazeux 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 (Castelle, 2010). Les valeurs les plus élevées en mercure gazeux ($3 \text{ à } 5 \text{ ng.m}^{-3}$) ont été mesurées lors de périodes de vent de Nord-Ouest (Mistral).

Crues et tempêtes:

Le suivi mensuel des **flux de MES et des concentrations en ETM (éléments traces métalliques) associées** sur les fleuves côtiers a permis d'étudier les variabilités inter et intra annuelles, d'établir les relations empiriques flux de matière/débit liquide, et d'alimenter les modèles hydro sédimentaires développés à l'échelle du Golfe du Lion. Les concentrations moyennes en ETM enregistrées dans les matières en suspension (MES) de la Têt et des autres fleuves côtiers sont en outre très proches de celle du Rhône. Les facteurs d'enrichissement⁵ (EF) montrent en outre que les matières en suspension ne sont que très faiblement impactées par les activités humaines (Aubert et al., 2007 ; 2008, 2011). Globalement, les concentrations en ETM et en radionucléides artificiels et naturels tendent à décroître significativement avec le débit vers des valeurs de référence caractéristiques du bruit de fond géochimique ou anthropique dans le cas spécifique des radionucléides artificiels (Eyrolle et al., 2010a ; Eyrolle et al., submitted). L'augmentation des concentrations en phase initiale de crue puis leur diminution rapide avec l'accroissement du débit (cas des ETM sur la Têt) ou bien encore

⁵ Le facteur d'enrichissement permet d'évaluer le niveau de contamination d'un système par rapport à un état de référence (bruit de fond géochimique dans le cas des ETM ou bruit de fond anthropique dans le cas des radionucléides artificiels).

l'enregistrement de cycle d'hystérésis (cas des isotopes du plutonium sur le Rhône) témoigne de la variabilité des termes sources alimentant les flux au cours des épisodes de crue (Aubert et al., 2008, 2011; Eyrolle et al., 2008a, 2008b ; Eyrolle et al., submitted).

Dans le cas du Rhône, nous avons montré que la **typologie des crues** peut être très différente d'un épisode à l'autre sans toutefois induire de modifications significatives des caractéristiques chimiques des flux exportés. Une exception notable a toutefois été enregistrée lors de l'**épisode atypique** de mai-juin 2008 caractérisé par des débits liquides modérés ($4310 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) associant des charges solides extrêmement élevées ($>1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$) (Marion et al., 2008, 2009, 2010a, 2010b ; Eyrolle et al., submitted). Cet épisode hydrologique lié à des précipitations intenses sur les bassins de la Durance et de l'Isère couplées à des lâchers de barrages a présenté une signature chimique singulière, à savoir des teneurs en ETM et en radionucléides extrêmement faibles. Nous avons démontré que l'absence de prise en compte de ces **événements 'semi anthropiques'** peut conduire à des sous ou sur estimations significatives des flux annuels (- 33% pour les MES, +50% pour Pb et Zn, par exemple dans le cas de 2008). Par ailleurs, les analyses de particules en suspension recueillies à Arles pendant certains épisodes de crue suggèrent une ou des sources de mercure en Cévennes. Sur la période 2006 à 2010, notons que 40% à 96% des flux solides, d'ETM et de radionucléides ont transité lors des crues.

Les **bilans apport/export** établis pour les radionucléides d'origine artificielle (^3H , ^{60}Co , ^{125}Sb , ^{110}mAg , ^{54}Mn , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu et ^{241}Am) mesurés dans les eaux du Rhône aval durant l'année 2008 soulignent une évacuation 'rapide' des effluents rejetés par les industries nucléaires implantées le long du Rhône. En effet, les bilans s'équilibrent à l'échelle annuelle et ce pour la plupart des radionucléides analysés. Les radionucléides artificiels à vie moyenne ou longue présents dans les compartiments de stockage du système rhodanien sont quant à eux progressivement évacués du système, notamment durant les épisodes de crues (Antonelli, 2010).

Au débouché du Rhône, l'impact des crues étudié par modélisation géostatistique de l'évolution des caractéristiques sédimentométriques⁶ de la couverture sédimentaire a permis d'identifier et de localiser l'influence de trois 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 (Maillet et al., 2011 ; Poizot et al., 2011). L'étude a également confirmé la faiblesse des transferts sédimentaires du fleuve vers le littoral adjacent en période de **crue** ou d'**étiage**. Par ailleurs, les travaux réalisés sur la caractérisation du lobe actuel du delta du Rhône comme analogue de l'impact des événements extrêmes sur les dépôts prodeltaïques montrent que l'archivage sédimentaire des événements de crue dans les dépôts sédimentaires à l'embouchure du Rhône est correct à l'échelle séculaire. 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.

Au niveau du **prodelta rhodanien**, nous avons montré que l'apport de sédiments peut atteindre plus de 40 cm à 30 m de profondeur lors des périodes de **crues** (Buscail et al., Marion et al., 2008, 2009, 2010a, 2010b). Les élévations plus importantes ont lieu lors d'épisode hydrologique marqué succédant à une longue période d'étiage associé à une période calme post crue favorisant le dépôt des sédiments. Les **tempêtes** susceptibles d'engendrer des **houles** de 2,5 à 3 m capables de remobiliser les sédiments sur le fond dans cette zone sont liées à deux **vents** dominants : le mistral venant du nord et les vents du secteur sud-est (CARMA ; Arnaud, 2009). Ces vents font apparaître des courants intensifiés sur une grande partie de la colonne d'eau qui suivent les lignes isobathes vers le sud-ouest, entraînant un transport latéral des sédiments le long des pentes du prodelta.

Enfin, nous soulignons que le rôle 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 semble être déterminant.

Cascading et convection : Il ressort des observations et des résultats de modélisation que, lors des épisodes de cascading, l'export du plateau est faible par contre l'**érosion de la pente** est forte (Palanques et al., 2010; Ulses et al., 2008). Des flux de matière importants ont été observés jusqu'à 1000 m de profondeur dans les canyons et sur la pente continentale pendant les épisodes de cascading intenses (1999, 2005, 2006) (Heussner et al, 2006; Bonnin et al, 2008 ; Pasqual et al, 2010). L'intensité des flux associés à ces épisodes est minime plus en profondeur sur le talus continental. Par ailleurs, des flux importants ont été observés dans le bassin profond du Golfe du Lion pendant l'épisode de convection profonde en 2009. Ces flux de matière sont probablement liés à la resuspension de sédiments profonds par les courants intenses (jusqu'à 45 cm/s) qui ont prévalu pendant cette période (Durrieu de Madron et al, in prep). Ces épisodes intenses de cascading et de convection participent activement à la remobilisation et à la dispersion des éléments chimiques sous forme dissoute et particulaire.

⁶ Analyses granulométriques (grain moyen, classement, asymétrie, ...).

4.4.3 Compartiments-puits (Berges, prodeltas, canyons et bassin profond)

Les enregistrements sédimentaires dans les **marges alluviales** du bas Rhône et de la Têt ont permis d'évaluer des facteurs d'enrichissement (EF) faibles à modérés en ETM et en radionucléides artificiels à vie moyenne ou longue. Pour quasiment tous les ETM, les apports d'origine anthropique diminuent à la fin des années 1960, à l'exception du Hg pour lequel la diminution ne s'effectue qu'à partir des années 1980. Concernant les radionucléides artificiels, les facteurs d'enrichissement les plus importants sont mesurés en profondeur dans les couches de sédiments représentatifs de la période 1960-1990 correspondant à la période de rejets maximums de radionucléides artificiels dans l'environnement par les industries nucléaires rhodaniennes. Les radionucléides artificiels concernés sont les ^{137}Cs , l' ^{241}Am et les isotopes du plutonium, ceux à vie plus courte ayant disparu du milieu environnemental par décroissance radioactive (Ferrand et al., 2009 ; 2011 in press).

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. Nos résultats montrent que la chronologie de la « métamorphose » fluviale, qui a transformé le Rhône au cours du 20^{ème} siècle, apparaît comme le principal facteur d'explication de la variabilité des taux de sédimentation et du stockage des radionucléides au sein de ces compartiments puits (Provansal et al., 2010 ; Provansal et al., accepted). Les sédiments du **prodelta du Rhône** ont enregistré les variations de la contamination par les apports du Rhône depuis plus de 150 ans. Ils témoignent par exemple de l'augmentation des concentrations en mercure depuis le début de l'ère industrielle, puis leur diminution au cours des dernières décennies, parallèlement à l'évolution de la consommation de charbon en France. Tous les métaux montrent une augmentation de leurs concentrations du fond vers le haut des profils sédimentaires avec un maxima de sub-surface, tel que cela avait été observé pour certains radionucléides (Marion et al., 2010a; Lansard, 2005).

Les concentrations en mercure et en plomb déterminées dans deux carottes du **Canyon** du Cap de Creus prélevées par 1000 et 1400 m de profondeur 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 Crés, 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 précédent. 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 (Heimbürger et al., in press).

Enfin, une étude de la variabilité spatiale des propriétés à la fois physiques et chimiques du sédiment de surface (0-0,5 cm) dans ces milieux profonds, indique 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 (Stabholz et al., 2011).

4.4.4 Vecteurs préférentiels de transfert (suspension/charriage, translocation, chenaux, canyons)

L'export solide du Rhône vers le milieu marin par le **transit de la charge de fond** a été appréhendé au cours d'EXTREMA. Les mesures bathymétriques effectuées au cours de la crue d'octobre 2008 sur le Rhône aval ont permis de calculer des volumes de **charge de fond** remobilisés ainsi que les vitesses de déplacement des dunes sableuses sur le fond du chenal. Par extrapolation des données de transport solide de la crue d'Octobre 2008 aux autres événements hydrologiques de l'année, le flux solide total du Rhône à l'embouchure pour l'année 2008 pourrait atteindre $19,2 \cdot 10^6$ tonnes ($\pm 30\%$), dont $9,1 \cdot 10^6$ tonnes en suspension (Raccasi et al., in prep). La pertinence de l'extrapolation doit toutefois être confortée.

Au niveau des canyons, 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 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.

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

Dans le cadre du projet, les simulations analysées couvrent pour la période présente 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 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. Les simulations réalisées mettent en évidence que le temps de résidence sur le plateau du Golfe du Lion des apports des fleuves situés sur la côte ouest du Golfe du Lion (Hérault, Orb, Aude, Agly, Tet et Tech) est très nettement plus faible que celui des apports du Rhône en raison d'une hydrodynamique très puissante qui balaie la côte occidentale du Golfe du Lion. Ceci explique l'absence de prodelta développé pour ces fleuves.

Il semble qu'à l'échelle de ces 5 années, le prodelta du Rhône stocke environ 55% des apports de ce fleuve sur environ 300 km^2 tandis qu'environ 25% resteraient sur le plateau hors prodelta. Ceci ne signifie pas que ces 25% sont stockés de manière durable mais que le transfert vers l'exutoire se fait lentement de manière sporadique à la faveur des tempêtes successives (à raison de une à trois par an), chacune produisant un transfert vers l'ouest d'environ quelques dizaines de kilomètres par an.

Les fleuves de l'ouest au contraire exportent proportionnellement beaucoup plus à l'occasion de chacune des tempêtes, en partie en raison de la proximité de l'exutoire que constitue l'extrémité sud-ouest du golfe. 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 (Estournel *et al.*, in prep). Il ressort que l'export depuis le plateau est fort lors des tempêtes mais faible pour les événements de cascading en raison de l'effet des houles qui resuspendent le matériel et également car les courants sont beaucoup plus puissants dans le premier cas. Cet export varie sur les 5 années de 3 à 14 millions de tonnes par an. 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 car, dans le premier cas, les courants de fond, proportionnels à la pente bathymétrique, sont intenses alors que, dans le second cas, les tempêtes ne se font pas sentir aux grandes profondeurs. 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 plusieurs mois ou années plus tard 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, ainsi que 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, concernant le changement climatique, les changements encore mal identifiés sur les apports des fleuves ou la fréquence des événements extrêmes ne nous ont pas paru pertinents à traiter ici car la méthodologie serait particulièrement complexe et nécessiterait, pour comparer les deux périodes présente et future, la simulation de plusieurs décades afin de pouvoir s'extraire de la variabilité interannuelle qui domine le signal. En revanche, nous avons retenu du changement climatique la diminution drastique du cascading lié au réchauffement progressif des eaux de surface au cours du 21^{ème} siècle et donc à l'augmentation de la stratification verticale qui empêche les eaux

de surface de plonger à des profondeurs importantes ([Herrmann et al., 2008](#)). Dans la mesure où, par contre, les conditions météorologiques hivernales ne devraient pas être significativement modifiées, nous avons opté la reconduction des simulations des années 2005 à 2008 en modifiant seulement la stratification ambiante conformément à l'étude citée ci-dessus. Cela permet de comparer facilement les deux périodes et d'extraire le signal du changement climatique.

Le grand changement qui apparaît dans la simulation du climat futur est l'absence d'érosion sur la pente et le bassin profond en raison de la forte réduction du cascading et de la convection. Le phénomène majeur reste l'érosion du plateau par les tempêtes. Les sédiments érodés se déposent alors durablement sur le haut de la pente.

4.5 DISCUSSION

(1 page maxi)

L'étude des apports atmosphériques et des retombées sahariennes en France a permis de souligner que les incendies de forêt peuvent constituer un forçage supplémentaire significatif dans la (re)alimentation du compartiment atmosphérique en certains contaminants. Ces épisodes occasionnés par des états de sécheresse actuellement en recrudescence et/ou par une modification des modes d'exploitation ou de gestion des forêts (Cas de la Biélorussie) sont à considérer avec la plus grande attention dans le contexte des changements climatiques et environnementaux. L'impact de ces épisodes sur la qualité des ressources en eau a par ailleurs été démontré ([IAHS-ICCE International Conference on Wildfire and Water Quality, 2012](#)).

Outre les épisodes sahariens et les feux de biomasse, nos travaux ont mis en évidence le poids des sources anthropiques dans la variabilité des teneurs et du comportement des polluants présents dans le compartiment atmosphérique. Ainsi, par exemple, le rôle du compartiment marin et de la typologie des vents sur les concentrations de certains contaminants dans l'air en milieu continental côtier (cas du mercure) a été souligné. Ces voies de transferts originales et peu renseignées sont à étudier plus avant en particulier sur les milieux côtiers dans la région de Fukushima (cycle de l'iode, du tellure et du tritium terre/océan/atmosphère/terre, reprise éolienne des dépôts du tsunami contaminés par les retombées de l'accident).

Par ailleurs, les exports par les rivières, en particulier les exports solides, sont de mieux en mieux appréhendés par l'exploitation des chroniques de suivi des concentrations couvrant des gammes de débits de plus en plus étendues grâce au renforcement du monitoring lors des épisodes de crue. Ces chroniques permettent de disposer de relations charge/débit de plus en plus significatives restreignant d'une manière générale les incertitudes sur les flux (paramètre d'entrée des modèles hydro sédimentaires en milieu marin). Si les travaux réalisés dans EXTREMA ont permis d'alimenter ces chroniques et de consolider ces relations, ils ont toutefois souligné que les lois établies ne prennent en considération ni les exports par la charge de fond, particulièrement conséquents dans le cas du Rhône, ni les épisodes hydrologiques d'origine semi anthropique (gestion des ouvrages hydroélectriques, dragages, chasses). Le poids de ces deux facteurs dans l'alimentation des flux solides et de contaminants associés vers le milieu marin n'est que très partiellement connu.

Par ailleurs, si la typologie des crues ne semble pas induire de modifications significatives des caractéristiques chimiques des flux exportés, l'origine des masses sédimentaires en transit lors des épisodes semblent être un facteur de variabilité important des concentrations pour certains contaminants. Des actions de recherches dans ce sens sont à entreprendre afin de contraindre notamment les incertitudes sur les flux.

A noter que la contribution des marges alluviales dans les flux actuels de contaminants semble être restreinte pour la plupart des éléments étudiés, notamment en raison des niveaux de contamination historiquement modérés des hydro systèmes étudiés (Rhône et Têt), à l'exception toutefois des éléments radioactifs artificiels à vie moyenne et longue dans le cas du Rhône.

Il est en outre important de souligner que les zones d'interface continent/océan (partie terminale des fleuves) constituent des milieux réactionnels forts, conduisant à des modifications drastiques souvent avérées des flux en transit via les processus de coagulation/floculation ou de désorption/adsorption. Dans la majorité des cas, les données acquises et les suivis réalisés actuellement permettent de

quantifier les flux bruts à l'exutoire des bassins versants, c'est-à-dire en amont de la zone d'influence marine. Il est absolument nécessaire de s'orienter vers une quantification des flux nets à la mer, c'est-à-dire une quantification des flux exportés en aval de la zone d'interface et parvenant réellement au milieu marin. Cette approche est en cours sur le Rhône par l'instrumentation pérenne du bac de Barcarin implanté dans la zone d'interface en aval de la station observatoire SORA d'Arles. Cette nouvelle plateforme permettra à terme de soutenir les données haute fréquence de la station d'Arles. Par ailleurs, il semble incontournable d'appréhender les flux nets à la mer dans la région de Fukushima et de caractériser les processus de transfert des contaminants radioactifs dans ces interfaces eau douce/eau de mer spécifiques. Des réflexions sont actuellement en cours, notamment avec les équipes impliquées dans EXTREMA, afin de fédérer des recherches dans ce sens.

Enfin, les observations et la modélisation dans la zone du prodelta du Rhône, source secondaire de matière particulaire pour le plateau du Golfe du Lion, ont permis de mieux comprendre la dynamique spatio-temporelle de ces systèmes d'interface. Si la région située à moins de 20 mètres est maintenant connue grâce aux observations comme siège de dépôt temporaire (déposé lors des crues et remis en suspension pendant les tempêtes suivantes), seule la modélisation peut répondre pour l'intégralité de la zone, étant donné la complexité d'instrumenter cette région. Les résultats acquis sur les quantités d'apports du Rhône stockées globalement sur le prodelta sont encore en cours de consolidation grâce à une confrontation avec la série de carottes prélevées en 2008 sur la région. Les différents événements qui émaillent cette année (crue et plusieurs tempêtes) doivent nous permettre de mieux caler le modèle pour ce qui est des paramètres cruciaux pour les bilans que sont par exemple les tensions critiques. Un effort très novateur a également été réalisé très récemment pour inclure l'effet de la dérive littorale grâce au développement dans SYMPHONIE d'un module complet d'interaction houle courant (Michaud et al., 2011). Ce module doit nous permettre d'inclure pleinement la zone littorale (0-20m) et les transports de sable dans notre analyse et ainsi de faire le lien avec les observations nombreuses dans la zone.

Concernant l'ensemble du plateau, il est clair que les observations sont là aussi manquantes en particulier entre la zone d'apport (le Rhône) et l'exutoire (le sud-ouest du plateau) pour comprendre la modélisation de la dynamique temporelle des transferts entre ces deux zones. Le suivi d'un ou quelques points sur un transect cross-shore au large de Sète serait pour cela idéal.

4.6 CONCLUSIONS

(1/2 page maxi)

EXTREMA a permis d'apporter une contribution dans l'évaluation des conséquences de certaines manifestations du changement global sur la répartition des contaminants à l'échelle d'un système côtier.

Les environnements côtiers, incluant les fleuves et leur bassin versant, les zones d'interfaces continent/océan, le milieu marin depuis les littoraux jusqu'aux pieds des marges des plateaux continentaux constituent des systèmes particulièrement vulnérables au changement du climat et aux sources de contamination (anthropisation intensive des vallées, développement des mégapoles et industrialisations littorales). Les récents événements qui ont frappés le Japon en particulier dans la région de Fukushima sont là pour nous le rappeler. Le bassin versant de la Méditerranée particulièrement impacté par diverses typologies d'épisodes climatiques extrêmes incluant des apports atmosphériques paroxystiques de poussières sahariennes, de forts contrastes hydrologiques rythmés par de longues périodes d'étiage et l'occurrence de crues éclairs ou bien encore des transferts de masse prononcés par cascades ou convection pouvant impacter l'ensemble du Golfe du Lion, a été choisi comme système atelier de nos recherches.

Nos travaux ont permis de caractériser les transferts de matière et de contaminants associés à ces épisodes climatiques majeurs. Les différents vecteurs de transfert inter compartiments et les dynamiques des principaux milieux d'accumulation (puits) ou d'alimentation (sources) tels que les poussières atmosphériques, les marges alluviales et dépôts d'inondation, les prodeltas et les canyons du milieu marin profond ont été caractérisés.

Au terme du projet, il semble que le processus majeur identifié pouvant conduire à plus ou moins long terme à une modification significative de la distribution des polluants anthropiques dans l'environnement, soit lié à la réduction du cascading et de la convection. Une des conséquences majeures de ce changement abrupt pourrait être une séquestration des polluants au niveau du plateau continental, lieu privilégié de la production primaire majeure et siège de développement des ressources marines.

4.7 BIBLIOGRAPHIE

- Antonelli C., Eyrolle F., Rolland B. and Provansal M. et Sabatier F., 2008, Suspended sediment and ¹³⁷Cs fluxes during the exceptional December 2003 flood in the Rhone River, southeast France, *Geomorphology*, 95, 350-360.
- Antonelli, 2010, 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., Charmasson S. and Barker E., 2003, Man-made Radionuclide Inventory in Sediment off the Rhône River Mouth (N W Mediterranean Sea): Time Trend. Proceedings from the 5th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (AIG-5), May 26-30 2003, Heron Island, 17-19.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Avila A., Alarcón M. and Queralt I., 1998, The chemical composition of dust transported in red rains - its contribution to the biogeochemical cycle of a holm oak forest in Catalonia (Spain), *Atmospheric Environment*, 32, 2, 179-191.
- Béthoux J.P., Durrieu de Madron X., Nyffeler F. and Taillez D., 2002, Deep water in the western Mediterranean: peculiar 1999 and 2000 characteristics, shelf formation hypothesis, variability since 1970 and geochemical inferences, *J. Mar. Systems*, 33-34, 117-131.
- Boé J., 2007, Changement global et cycle hydrologique : Une étude de regionalization sur la France. Soutenance de thèse, 22/12/2007.
- Bonnin J., Heussner S., Calafat A., Fabres J., Palanques A., Durrieu de Madron X., Canals M., Puig P., Avril J., Delsaut N., 2008, Comparison of horizontal and downward particle fluxes across canyons of the Gulf of Lions (NW Mediterranean): Meteorological and hydrodynamical forcing. *Continental Shelf Research*, 28, 1957- 1970.
- 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.
- Canals M., Puig P., Durrieu de Madron X., Heussner S., Palanques A. and Fabres J., 2006, Flushing submarine canyons. *Nature*, 444, 354-357.
- CARMA, Conséquences des apports rhodaniens sur le milieu littoral associé : cas des événements extrêmes, Programme Inter-Régionale Midi-Pyrénées & Provence Alpes Côte d'Azur 2005-2006, Contrat 2005-19526/19527.48 pp.
- 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-005-04, 2007-2011), Rapport final de post doctorat IFREMER.
- Charmasson S., 1998, Cycle du combustible nucléaire et milieu marin - Devenir des effluents rhodaniens en Méditerranée et des déchets immergés en Atlantique Nord-Est. Thèse d'Etat, Université Aix-Marseille II, Report CEA-R-5826, Gif/Yvette, France, 359p.
- Charmasson S., Radakovitch O., Arnaud M., Bouisset P. and Pruchon A.-S., 1998, Long-core profiles of ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ⁶⁰Co and ²¹⁰Pb in sediment near the Rhône River (Northwestern Mediterranean Sea). *Estuaries*, 21, 3, 367-378.
- Charmasson S., 2003, ¹³⁷Cs inventory in sediment near the Rhône mouth: role played by different sources, *Oceanologica Acta* 26, 435-441.
- Cook G.T., A.B. Mackenzie, P. McDonald and S.R. Jones, 1997, Remobilisation of Sellafield derived radionuclides and transport from the north-east Irish Sea. *J. Environ. Radioactivity*, 5, 227-241.
- Ducharne, A., Habets, F., Déqué, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., Pagé, C., Ribstein, P., Sauquet, E., Thiéry, D., Terray, L., Viennot, P., Boé, J., Bourqui, M., Crespi, O., Gascoin, S., Rieu, J., 2009, Impact du changement climatique sur les Ressources en Eau et Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme, Rapport final du projet REXHySS, Programme GICC, 62 pp. http://www.sisyph.jussieu.fr/~agnes/rexhyss/documents_rapport.php.
- Dufau-Julliand C., Marsaleix P., Petrenko A. and Dekeyser I., 2004, Three-dimensional modeling of the Gulf of Lion's hydrodynamics (northwest Mediterranean) during January 1999 (MOOGLI3 Experiment) and late winter 1999: Western Mediterranean Intermediate Water's (WIW's) formation and its cascading over the shelf break, *Journal of Geophysical Research*, 109, C11002.
- Durrieu de Madron X., Abassi A., Heussner S., Monaco A., Aloïsi J.C., Radakovitch O., Giresse P., Buscail R. and Kerhervé P., 2000, Particulate matter and organic carbon budgets for the Gulf of Lions (NW Mediterranean), *Oceanologica Acta*, 23, 6, 717-730.
- Durrieu de Madron X., Stabholz M., Khripounoff A., Testor P., Calafat A., Taupier-Letage I., Houpert L., Delsaut N., Puig P., Impact of Open-Sea Convection on Particulate Fluxes and Sediment Dynamics in the Deep Basin of the Gulf of Lion (en préparation).
- Estournel C., Broche P., Marsaleix P., Devenon J.L., Auclair F. and Vehil R., 2001, The Rhône river plume in

- unsteady conditions : numerical and experimental results. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53, 25-38.
- Estournel C., Durrieu de Madron X., Marsaleix P., Auclair F., Julliand C. and R. Vehil, 2003, Observation and modelisation of the winter coastal oceanic circulation in the Gulf of Lions under wind conditions influenced by the continental orography (FETCH experiment). *Journal of Geophysical Research*, 108, C3, 7-1 to 7-18.
- EUROSTRATIFORM, European Margin Strata Formation, European Program, 2002-2005.
- Eyrolle F., Charmasson S. and Louvat D., 2004a, Plutonium isotopes in the lower reaches of the river Rhône over the period 1945-2000: Fluxes towards the Mediterranean Sea and sedimentary inventories, *Journal of Environmental Radioactivity*, Special issue, 74, 127-138.
- Eyrolle F., Duffa C., Leprieur F., Rolland B., Antonelli C., Marquet J., Salaun G. et Renaud Ph., 2004b, Conséquences radiologiques des inondations de décembre 2003 en Petite Camargue au lieu dit 'Claire Farine' - Résultats de l'expertise réalisée à la demande de la CLI du Gard, Rapport IRSN/DEI/SESURE/04-14.
- Eyrolle F., Duffa C., Rolland B., Antonelli C. and Leprieur F., 2006, Radiological consequences of the extreme flooding of the Rhône valley area (South east France, December 2003), *The Science of the Total Environment*, 366, 427-438.
- Eyrolle F., Provansal M., Villiet J., Raccasi G., Radakovitch O., Gurriaran R., Antonelli C., 2008a, 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., 2008b, Consequences of paroxysmic meteorological climatic events on the translocation of contaminants within the geosphere: The EXTREME Project, BERGEN, juin 2008.
- Eyrolle F., Claval D., Gontier G., Antonelli C., 2008c, Radioactivity level in major French rivers: summary of monitoring chronicles acquired over the past thirty years and current status, *Journal of Environmental Monitoring*, 10, 800-811.
- 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., Radakovitch O., Raimbault P., Antonelli C., Ferrand E., Raccasi G., Aubert D., Gurriaran R., Long term survey of suspended sediment and associated natural and artificial radionuclides transport in the Rhône River (south eastern France), *journal of soil and sediments*, submitted.
- 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.
- Ferrand E., Eyrolle F., Radakovitch O., Provansal M., Dufour S., Vella C., Raccasi G., Gurriaran R., 2011, Historical levels of heavy metals and artificial radionuclides reconstructed from overbank sediment records in lower Rhône River (South - East France), *Geochemica and Cosmochimica Acta*, special Issue on Environmental Records of Anthropogenic Impacts, sous presse.
- GEWEX, Global Energy and Water Cycle Experiment, Program initiated by the World Climate Research Programme (WCRP)
- Guieu C., Løye-Pilot M.D., Benyaya L. Dufour A., 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.
- 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.
- 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.
- Herrmann M., Estournel C., Somot S., Déqué M., Marsaleix P. and Sevault F., 2008, Impact of interannual variability and climate change on dense water cascading in the Gulf of Lions. *Continental Shelf Research*, 28 (15), 2092-2112.
- Heussner S., Durrieu de Madron X., Calafat A., Canals M., Carbonne J., Delsaut N., Saragoni G., 2006, Spatial and temporal variability of downward particle fluxes on a continental slope: lessons from an 8-yr experiment in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Marine Geology*, 234, 63-92.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van der Linden, P.J., and Xiaosu, D., 2001, Climate Change 2001: The scientific basis, Contribution of working group 1 to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, 944p.
- IAHS-ICCE International Conference on Wildfire and Water Quality: Processes, Impacts and Challenges, June 11-15, 2012, The Banff Centre, Banff, Alberta, Canada.
- IMFREX, Impact des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent, de température et de précipitation, programme du GICC APR 2002.
- Lansard B., 2005, Distribution et remobilisation du plutonium dans les sédiments du prodelta du Rhône (Méditerranée Nord-Occidentale), Rapport SESURE 2005-12, 180p.
- Lespinas, F., Ludwig, W. Heussner, S. in preparation, Impact of recent climate change on the hydrology of coastal rivers in the Gulf of Lions (NW France), In preparation for J. Hydrol.
- Ludwig W, Meybeck M, and Abousamra F, 2003, Riverine transport of water, sediments and pollutants to the Mediterranean Sea, UNEP MAP Technical report Series 141, UNEP/ MAP Athens 2003, 111 pp (available at <http://www.unepmap.org>).
- Ludwig, W., Serrat, P., Cesmat, L., and Garcia-Esteves, J., 2004, Evaluating the impact of the recent temperature increase on the hydrology of the Têt River (Southern France), *J. Hydrol.*, 289, 204-221.
- Maillet G., 2006, Apports de la géomorphologie à la détermination des facteurs de sensibilité radioécologique des

- berges - SENSIB volet Fluvial, Rapport de Post Doctorat IRSN/DEI/SESURE/06.
- 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., Vassas C., Arnaud M., 2008, 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.
- Marion C., Dufois F., Arnaud M., Vella C., 2010a, 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., 2010b, 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.
- 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.
- Masson O., Pourcelot L., Gurriaran R. and Paulat P., 2005, Impact radiologique des retombées de poussières sahariennes, Rapport IRSN/DEI/SESUE 2005-04, 37p.
- Michaud H., Leredde Y., Marsaleix P., Estournel C., Ardhuin F., 2011, Wave-induced current in a 3D circulation model, *Colloque EPIGRAM 2011, Ile de Ré*, 30 Mai au 1er Juin 2011.
- ORME, Observatoire Régional Méditerranéen de l'Environnement du Programme Environnement Vie et Sociétés du CNRS, initié en 2000.
- Palanques A., Durrieu de Madron X., Puig P., Fabres J., Guillén J., Calafat A., Canals M., Bonnin J., 2006, Suspended sediment fluxes and transport processes in the Gulf of Lions submarine canyons. The role of storms and dense water cascading. *Marine Geology*, 234, 43-61.
- Palanques A., Puig P., Guillén J., Durrieu de Madron X., Latasa M., Scharek R., Martin J., 2011, Effects of storm events on the shelf-to-basin sediment transport in the southwestern end of the Gulf of Lions (Northwestern Mediterranean). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1-8.
- Pasqual C., Sanchez-Vidal A., Zúñiga D., Calafat A., Canals M., Durrieu de Madron X., Puig P., Heussner S., Palanques A., Delsaut N., 2010, Settling particle fluxes across the continental margin of the Gulf of Lion: the role of dense shelf water cascading. *Biogeosciences*, 7, 217-231.
- 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*.
- PIGB, Programme International Géosphère-Biosphère, initié en 1998.
- PNEC, Programme National sur l'Environnement Côtier, initié en 1999.
- 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.
- 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.
- Puig P., Durrieu de Madron X., Salat J., Schroeder K., Martín J., Karageorgis A., Palanques A., Roullier F., Lopez-Jurado J.L., Emelianov M., Moutin T., Houpert L. Thick bottom nepheloid layers in the western Mediterranean generated by deep dense shelf water cascading. *Progress in Oceanography (soumis)*.
- Raccasi G., 2008, Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval, *Recherches en vue de la restauration hydraulique et de la gestion des crues*. Thèse de l'Université de Provence.
- Raccasi G., Sabatier F., Eyrolle F., Provansal M., Bedload contribution to sediment export in the lower Rhône River, in prep.
- Radakovitch, O., Roussiez, V., Ollivier, P., Ludwig, W., Grenz, Ch., and Probst, J.-L., 2008, Particulate heavy metals inputs from rivers and their deposits on the Gulf of Lion continental shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77, 285-295.
- Rolland B., 2006, Transfert des Radionucléides artificiels par voie fluviale : Conséquences sur les stocks sédimentaires et les exports vers la Méditerranée, Thèse de Géosciences de l'Environnement de l'Université Paul CEZANNE, 280 p.
- Rolland B., Antonelli C. and Eyrolle F., 2004a, Fluxes of suspended material and associated radionuclides to the sea during flood events of the Rhône River, *ECORAD 2004*, 6-10 sept. 2004, Aix en Provence, France.
- Rolland, Eyrolle F. et Bourlès D., 2004b, Estimation des flux de radioactivité artificielle drainée par le Rhône aval, *Colloque de Synthèse sur le Rhône et la Méditerranée*, 5-7 mai 2004, Marseille, France.
- Roussiez, V., Ludwig, W., Probst, J.L., and Monaco, A., 2005, Background levels of heavy metals in surficial sediments of the Gulf of Lions (NW Mediterranean): an approach based on 133Cs normalization and lead isotope measurements. *Environmental Pollution* 138, 167-177.
- Serrat, P., W. Ludwig, B. Navarro, and J.-L. Blazi, 2001, Variation spatio-temporelles des flux de matières en suspension d'un fleuve côtier méditerranéen: la Têt (France), *C. R. Acad. Sci.*, 333, 389-397.
- Somot S., Sevault F., and M. Déqué, 2006, Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the twenty-first century using a high-resolution ocean circulation model, *Climate Dynamics*, 27, 851-879.
- Stabholz M., Durrieu de Madron X., Kerhervé P., Sotin C., Jeanty G. and Heussner S., 2011. Impact of dense water

- formation formation events on deep marine sediments : spatial heterogeneity versus temporal variability, EGU General Assembly 2011, Geophysical Research Abstracts, 13, EGU2011-10655-1.
- Thomas A. J., 1996, Input of artificial radionuclides to the Gulf of Lions and tracing the Rhône influence in marine surface sediments, Deep-Sea Research, 44, 3-4, 577-595.
- Ulses C., Durrieu de Madron X., Estournel C., Bonnin J. and Marsaleix P., 2008, Impact of storm and dense water cascading interaction on shelf-slope exchanges in the western Gulf of Lion: observations and modelling, J. Geophys. Res., 113, C02010, doi:10.1029/2006JC003795.
- Ulses C., Estournel C., Durrieu de Madron X., Palanques A., 2008, Sediment transport in the Gulf of Lion (NW Mediterranean): Impact of extreme storms and floods. Continental Shelf Research, 28, 2048-2070.
- Ulses C., Grenz C., Marsaleix P., Schaaff E., Estournel C., Meulé S., and Pinazo C., 2005, Circulation in a semi enclosed bay under the influence of strong fresh water input, Journal of Marine Systems, 56, 113-132.
- Vives i Batlle J., 1993, Speciation and bioavailability of plutonium and americium in the Irish Sea and other marine ecosystems, PhD thesis, National university of Ireland, 347p.
- WCRP, Programme Mondial de Recherches sur le Climat, initié en 1980
- Williamson R.B., Van Dam L.F., Bell R.G., Green M.O. and Kim J.P., 1996, Heavy metal and suspended sediment fluxes from a contaminated, intertidal Inlet (Manukau Harbour, New Zealand, Marine Pollution Bulletin, 32, 11, 812-822.
- Witt G. and Siegel H., 2000, The consequences of the Oder Flood in 1997 on the distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Oder River Estuary, Marine Pollution Bulletin, 40, 12, 1124-1131.