

Projet EXTREME

Rapport d'avancement 2006

Frédérique Eyrolle, Olivier Masson, Sabine Charmasson

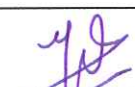

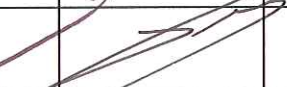

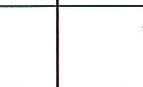
DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'INTERVENTION
SERVICE D'ÉTUDE ET DE SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ DANS
L'ENVIRONNEMENT

Projet EXTREME

Rapport d'avancement 2006

Laboratoire d'Étude Radioécologique du milieu Continental et Marin

Rapport DEI/SESURE n° 2007 - 39

| | Réservé à l'unité | | Visas pour diffusion | | |
|------------|---|---|---|---|---|
| | Auteur(s) | Vérificateur | Chef du SESURE | Directeur DEI | Directeur Général de l'IRSN |
| Noms | Frédérique Eyrolle | P. RENAUD | J.M. PERES | D. CHAMPION | J. REPUSSARD |
| Dates | 15/05/2007 | 11/08/2007 | 8/08/07 | | |
| Signatures |  |  |  |  |  |

PARTICIPANTS A CETTE ETUDE

| Nom | | Organisme |
|----------------------|--|---------------------------|
| Mireille Arnaud | | IRSN/DEI/SESURE/ LERCM |
| Sabine Charmasson | | IRSN/DEI/SESURE/ LERCM |
| Olivier Masson | | IRSN/DEI/SESURE/ LERCM |
| Christelle Antonelli | | IRSN/DEI/SESURE/ LERCM |
| Vincent Boullier | | IRSN/DEI/SESURE/ LERCM |
| Lionel Saey | | IRSN/DEI/SESURE/ LERCM |
| Pascal Paulat | | IRSN/DEI/SESURE/ LERCM |
| Rodolfo Gurriaran | | IRSN/DEI/STEME/ LMRE |
| Sébastien Aubry | | IRSN/DEI/STEME/ LMRE |
| Xavier Cagnat | | IRSN/DEI/STEME/ LMRE |
| Aline Maigret | | IRSN/DEI/STEME/ LMRE |
| Djamel Mekhlouche | | IRSN/DEI/STEME/ LMRE |
| Sandrine Thomas | | IRSN/DEI/STEME/ LMRE |
| Cédric Le-Corre | | IRSN/DEI/STEME/ LMRE |

Résumé

Le projet EXTREME initié en 2005 au SESURE/LERCM a pour objectifs d'acquérir des données sur les conséquences des épisodes météo climatiques extrêmes sur la redistribution des radionucléides artificiels au sein des différents compartiments de la géosphère. Ce rapport présente la synthèse des actions développées en 2006 en matière de positionnement et de cofinancement du projet par le biais de programmes de recherche régionaux ou nationaux (CARMA, EXTREMA, ECCOREV), d'acquisition de données, de valorisation et de collaboration scientifique.

Mots-clefs

Radionucléides, évènements, changement climatique, atmosphère, milieu aquatique continental, milieu aquatique marin.

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUCTION | 6 |
| 2 PROGRAMMES DE RECHERCHES REGIONAUX ET NATIONAUX SUPPORTS | 7 |
| 2.1 LE PROJET INTER REGIONAL CARMA 2005-2006 (AFFAIRE 150001271010)..... | 7 |
| 2.2 LE PROJET ANR EXTREMA 2007-2010 (AFFAIRE 15000126)..... | 8 |
| 2.3 LE PROJET DE FEDERATION DE RECHERCHE ECCOREV..... | 9 |
| 3 ACQUISITION DES DONNEES | 9 |
| 3.1 METROLOGIE | 9 |
| 3.2 RETOMBES ATMOSPHERIQUES EVENEMENTIELLES | 9 |
| 3.3 CONSEQUENCES DES CRUES ET DES TEMPETES SUR LA REPARTITION DES CORPS SEDIMENTAIRES..... | 10 |
| 3.3.1 En milieu fluvial | 10 |
| 3.3.2 En milieu marin..... | 12 |
| 4 VALORISATION SCIENTIFIQUE | 14 |
| 4.1 THESES IRSN SUPPORT | 14 |
| 4.2 POST DOCTORAT IRSN SUPPORT | 15 |
| 4.3 PUBLICATIONS DANS DES REVUES SCIENTIFIQUES | 15 |
| 4.4 PARTICIPATION À CONGRÈS | 16 |
| 4.5 RAPPORTS INTERNES | 17 |
| 4.6 ATELIERS / SEMINAIRES..... | 18 |
| 5 COLLABORATIONS | 18 |
| 6 CONCLUSIONS | 19 |
| 7 REFERENCES CITEES | 19 |

1 INTRODUCTION

Le projet **EXTREME** a été initié en 2005 par le SESURE/LERCM afin d'évaluer les conséquences des épisodes météo climatiques paroxystiques sur la répartition des stocks de radioactivité artificielle au sein des différents compartiments de la géosphère (Eyrolle et al., 2005). Certains forçages d'origine météo climatique tels que les précipitations, les dépôts de poussières sahariennes, les crues, les inondations, les tempêtes en milieu côtier sont en effet à l'origine de flux importants de matière et de contaminants associés. Les premiers résultats acquis en amont du projet **EXTREME**, dans le cadre de l'étude intégrée **CAROL** (Duffa et Renaud, 2004), ont montré que les flux de radioactivité générés par certains aléas pouvaient être équivalents aux flux intégrés sur plusieurs mois ou plusieurs années, et jouer un rôle majeur sur la répartition des stocks en place.

Le projet **EXTREME** a pour objectifs :

1. De déterminer les fréquences d'occurrence des aléas de manière rétrospective sur les 30 dernières années à partir des données hydrologiques et météo climatiques.
2. De quantifier les niveaux de radioactivité et les flux générés par les aléas par rapport aux valeurs moyennes annuelles généralement utilisées dans les codes de calcul.
3. De préciser les conséquences des aléas sur la redistribution des stocks actuels de radioactivité en particulier sur celle des corps sédimentaires continentaux et marins.
4. D'acquérir des données d'entrée nécessaires à l'évaluation des conséquences radiologiques potentielles des aléas sur les populations directement ou indirectement impactées.

Le projet développe ses travaux à l'échelle du territoire français pour les retombées atmosphériques et sur la partie terminale du Rhône, incluant le fleuve et son prodelta, pour les forçages d'origine hydrologique et/ou météorologique (crues, inondations, houle, vent, tempêtes) (Figure 1).

Les résultats attendus sont une classification des événements par typologie en précisant leur fréquence, leur durée et leur étendue spatiale, en soulignant les flux et les niveaux de radioactivité générés par rapport aux valeurs moyennes attendues.

Ce rapport a pour objectifs de présenter les actions entreprises et les valorisations effectuées depuis le début du projet, en particulier au cours de l'année 2006 :

- Le lancement des affaires **CARMA** et **EXTREMA** qui permettent à la fois de développer et structurer les collaborations et obtenir des cofinancements (Figure 2),
- Les reconnaissances par les pôles de compétitivité et le projet de Fédération de Recherche **ECCOREV**,
- Les avancées scientifiques par thème et leur valorisation sous forme de thèses, publications, congrès, etc...



Figure 1 : Compartiments et forçages étudiés dans le cadre d'EXTREME

2 programmes de recherches régionaux et nationaux supports

2.1 Le projet inter régional CARMA 2005-2006 (Affaire 150001271010)

L'étude des transferts du milieu marin côtier vers le plateau continental du Golfe du Lion lors des événements extrêmes est réalisée dans le cadre du projet CARMA (Conséquences des Apports Rhodaniens sur le Milieu littoral Associé : cas des événements extrêmes, **Affaire 150001271010**). Ce projet initié en 2005 pour 24 mois est financé par les régions Midi Pyrénées et PACA, par l'agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse ainsi que par le Fond Européen de Développement Régional (FEDER).

L'objectif principal de CARMA est la compréhension du fonctionnement hydro-sédimentaire de la région sous influence des apports rhodaniens en mettant l'accent sur les conséquences des crues et des tempêtes (1) sur les profonds remaniements du littoral et (2) sur le devenir des particules fines qui piègent la matière organique et les contaminants, notamment les radionucléides.

Les points forts de ce projet sont la mise en œuvre d'une instrumentation performante (courantomètres Doppler, altimètres acoustiques) dans le débouché du Rhône ainsi que le développement de la modélisation associée (Arnaud et al., 2007). CARMA est développé en partenariat avec le Pôle d'Océanographie Côtière de l'Observatoire Midi-Pyrénées (Laboratoire d'Aérodologie/LEGOS - Toulouse), le Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE - Aix-en-Provence), et les industriels : Noveltis - Toulouse, Adhoc Vision - Marseille et InVivo Environnement - La Ciotat.

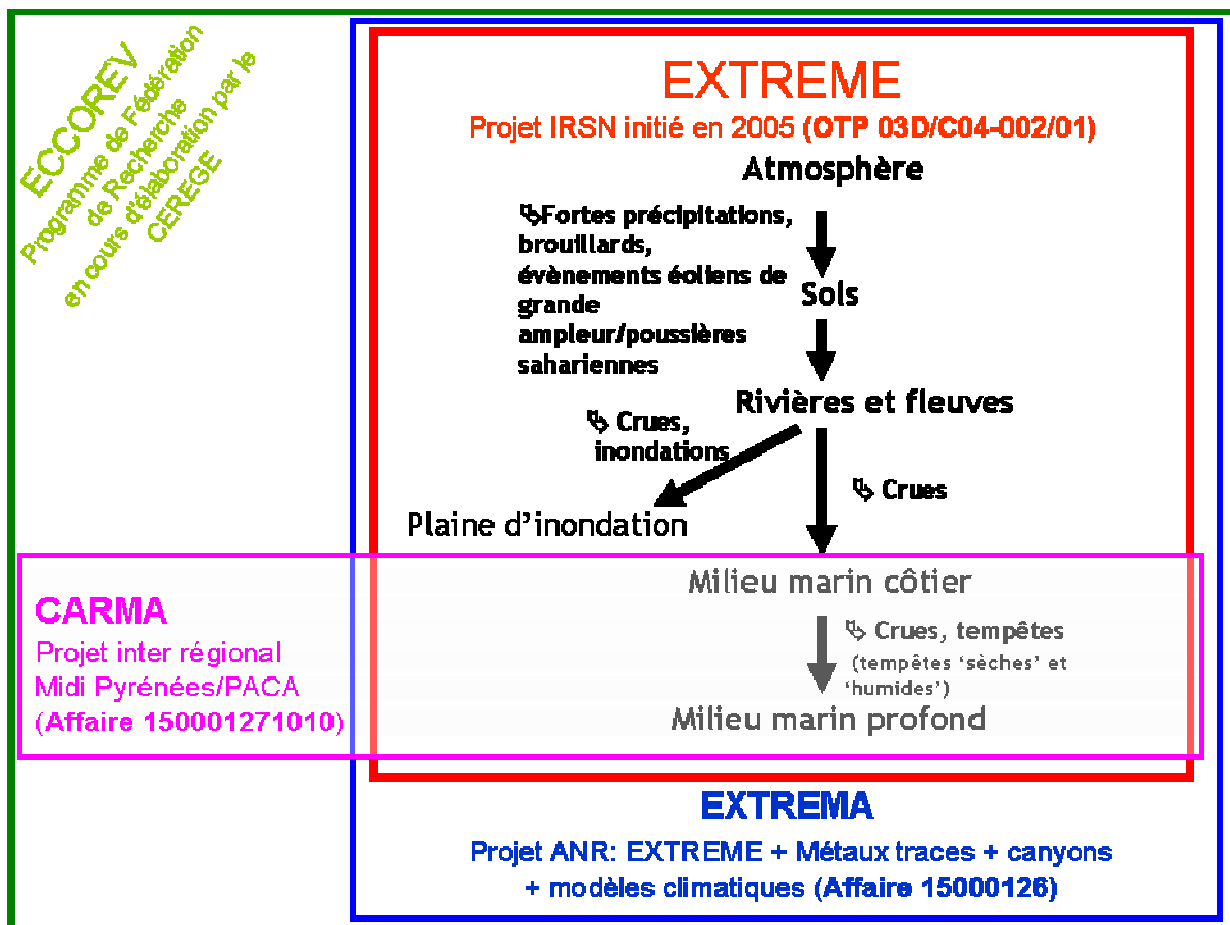


Figure 2 : Structure du projet EXTREME

2.2 Le projet ANR EXTREMA 2007-2010 (Affaire 15000126)

La thématique d'EXTREME intéresse particulièrement les programmes de recherches dédiés à l'étude des conséquences du changement climatique. En effet, l'une des principales manifestations du changement climatique concerne l'amplification de la saisonnalité et de la fréquence des épisodes météo climatiques extrêmes, comme en témoignent de manière univoque les conclusions des principaux programmes de recherches sur le changement global (WCRP, GEWEX, PIGB, GICC, IMFREX). C'est dans ce cadre que le laboratoire a répondu à l'appel à projet du programme 'Vulnérabilité - Climat et milieux' émis par l'ANR en juin 2006 en partenariat avec le Centre de Formation et de Recherche sur l'Environnement Marin (CEFREM, Université de Perpignan CNRS UMR 5110), le Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE, Université Paul Cézanne Aix-Marseille III CNRS UMR 6635), l'IFREMER et le Laboratoire d'Aérodynamique du Pôle d'Océanographie Côtière de l'Observatoire Midi-Pyrénées (LA, Toulouse CNRS UMR 5560). Le projet déposé, EXTREMA, a été retenu pour financement par l'ANR en novembre 2006 et a été labellisé aux pôles de compétitivité 'Mer PACA' et 'Gestion des Risques et Vulnérabilité des Territoires'.

EXTREMA reprend les objectifs d'EXTREME en élargissant toutefois son champ d'investigations d'une part aux contaminants métalliques stables (Cu, Pb, Cd et Hg), et d'autre part à la têt et au Golfe du Lion jusqu'aux canyons sous marins en marge du plateau continental. EXTREMA inclut enfin une forte composante modélisation qui permettra d'élaborer de manière prédictive les conséquences du changement global sur la répartition des stocks de contaminants à l'échelle de l'ensemble du Golfe du Lion pour les 20 à 30 prochaines années. Ces travaux seront

développés sur la base des modèles hydro-sédimentaires du LA de Toulouse et du modèle ARPEGE de Météo-France, sur la base du scénario de changement climatique A2 de l'IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Somot et al. 2006).

2.3 Le projet de Fédération de Recherche ECCOREV

En 2006, les thématiques de recherche d'EXTREME ont également été retenues dans le dossier scientifique du projet de Fédération de Recherche ECCOREV à l'initiative des Instituts Fédératifs de Recherche (IFR 112 et IFR 86). EXTREME est inscrit dans l'axe 1 d'ECCOREV ciblé sur la morphogénèse, les risques naturels et la variabilité climatique. Cet axe a pour vocation d'étudier les processus qui concourent à l'évolution de la topographie et des paysages à toutes les échelles de temps, c'est-à-dire de l'échelle instantanée de la « crise » (tempête, inondation, incendie, glissement de terrain, séisme), à l'échelle plus long terme des paysages, des marqueurs morphologiques ou des bassins versants. La variabilité climatique constitue souvent le paramètre « déclencheur » des processus « morphogénétiques ». Mais elle n'est efficace que dans des contextes topographiques et/ou lithologiques favorables. Les modes de gestion anthropiques peuvent aggraver les impacts des instabilités naturelles, voire déterminer l'apparition des risques : glissements de terrain, incendie, inondations, tempêtes, mobilisation littorale... L'objectif de cet axe est de caractériser et quantifier ces « instabilités » (ou aléas) et d'analyser leurs interférences avec les enjeux humains en termes de vulnérabilité.

Ce projet a été déposé par le CEREGE. L'instruction du dossier est en cours. Outre la mise en synergie des compétences et des moyens des différents partenaires, ce projet fédératif permettra de financer notamment des équipements.

3 Acquisition des données

3.1 Métrologie

Les mesures de radioactivité réalisées dans le cadre d'EXTREME sont supportées par le laboratoire DEI/STEME/LMRE. EXTREME s'appuie en outre sur les données acquises dans le cadre de OPERA atmosphérique et de OPERA fluvial (SORA). Le tableau 1 présente la synthèse des mesures réalisées en 2006.

| Volet | Spectrométrie γ | Spectrométrie α | ICPMS |
|--|------------------------|------------------------|-------|
| Atmosphérique (poussières sahariennes) | 10 | 10 | 5 |
| Fluvial | 74 | - | - |
| Marin | 400 | 80 | - |

Tableau 1 : Bilan des mesures de radioactivité pour 2006

3.2 Retombées atmosphériques évènementielles

Entre 500 000 et 4 Mtonnes partent chaque année du Sahara, à destination de l'Europe par transfert atmosphérique. En France, 4 à 5 épisodes par an sont observables sur le continent et près d'une vingtaine en Corse. La fréquence de ces épisodes est en augmentation depuis 1998. A l'échelle du territoire français, les flux de particules associés à ces épisodes extrêmes varient de moins de 1 et 35 g/m²/an. Ils présentent une grande variabilité spatiale et temporelle et

constitueraient l'équivalent de près de 90 % du flux moyen annuel de ^{137}Cs apporté par les précipitations.

L'étude des épisodes de poussières sahariennes repose sur le suivi journalier de l'empoussièrement saharien sur la France à partir des prévisions en libre accès sur Internet (Université d'Athènes, Dust REgional Atmospheric Model (DREAM)). Des enregistrements systématiques de 4 prévisions quotidiennes sont réalisés et les données sont archivées par le laboratoire. Ce suivi permanent a été mis en place dès 2004 et s'est poursuivi en 2006. Il s'agit en particulier de prévisions sous forme cartographique :

- de l'empoussièrement intégré sur toute la colonne d'air et exprimé en mg.m^{-2} ,
- des dépôts secs issus des soulèvements de particules et exprimés mg.m^{-2} ,
- des dépôts humides issus des soulèvements de particules et des précipitations rencontrées tout au long du transport (exprimés mg.m^{-2}).

Des prélèvements spécifiques sont également réalisés depuis 2004 dans l'eau de pluie, les aérosols et les dépôts au sol. Ces échantillons permettent de mesurer les niveaux d'activité et dans les échantillons les plus conséquents de caractériser les textures. En 2006, le recensement des dépôts historiques de poussières sahariennes sur la France a été initié (30 dernières années). Actuellement une centaine d'évènements ont été répertoriés dans la littérature.

Les résultats montrent que la conjonction d'un flux de masse important associé aux évènements et d'une activité massique en ^{137}Cs élevée génère les valeurs les plus fortes observées aujourd'hui dans le compartiment atmosphérique (entre 3 et 10 fois la valeur moyenne, i.e. $0,3 \mu\text{Bq m}^{-3}$).

En 2006, l'installation d'une nouvelle station a démarré en Corse à Bonifacio. Elle permettra la collecte des aérosols et des précipitations notamment lors des épisodes sahariens. Enfin, la station OPERA de la Seyne/Mer doit être équipée d'un collecteur découvrant automatisé de 3 m^2 , muni d'un revêtement adapté aux analyses de métaux traces dans les échantillons récoltés.

3.3 Conséquences des crues et des tempêtes sur la répartition des corps sédimentaires

3.3.1 En milieu fluvial

L'année 2006 a été marquée par la soutenance de la thèse de Benoît Rolland, dédiée à l'étude des conséquences des évènements de crues du Rhône sur les stocks sédimentaires fluviaux et les exports vers la Méditerranée (Rolland, 2006). Les conclusions de ce travail ont souligné le rôle majeur des évènements dans les flux d'exportation vers le milieu marins : en une vingtaine de jours de crues par an transitent plus de 80% du flux solide et 50 à 70% des flux de ^{137}Cs , de $^{238,239,240}\text{Pu}$ ou encore de radioactivité naturelle. La reprise lors des crues des stocks sédimentaires fluviaux de radioactivité, constitués au cours de plus de 40 ans de rejets chroniques dans le fleuve, peut aujourd'hui alimenter jusqu'à 50% des flux annuels dans le cas des éléments à vie moyenne et longue.

Les conséquences des crues sur les flux en transit et sur la redistribution des masses sédimentaires sont également appréhendées par l'étude des berges du bas Rhône initiée dans le cadre de la thèse de Benoît Rolland (Rolland, 2006). Outre les zones d'accumulation inhérentes à l'anthropisation du fleuve (barrages, écluses, casiers), des zones de rétention naturelles ont été identifiées au sein des espaces rivulaires (berges, îles et bras morts). En janvier 2006, un front de berge en accrétion sommitale et érosion basale situé en rive droite du Rhône à Fourques a été étudié en collaboration avec le CEREGE. Les résultats soulignent une augmentation de plus d'un ordre de grandeur des activités en ^{137}Cs et ^{241}Am avec la profondeur (Figure 3). Ces accumulations de radioactivité sont observées sur 5 m d'épaisseur et les différentes strates permettent de retracer la chronologie des flux solides associés aux évènements de crues de 2003, 2002, 1994, 1993 et antérieurs ; La base du profil correspondant à des sédiments déposés au début du siècle

dernier (Villier, 2006 ; Provansal et al., en préparation). La rétention des radionucléides dans les milieux rivulaires a fait ainsi l'objet d'une étude particulière dans le cadre du projet SENSIB (Maillet et al., 2007).

Les crues du Rhône font toujours l'objet d'un suivi pérenne au moyen de la station observatoire fluviale du réseau OPERA implantée à Arles (SORA) (Antonelli et al., 2007). Les épisodes de crues sont spécifiquement étudiés pour des débits liquides supérieurs à $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ par des prélèvements automatisés des matières en suspension en surface à proximité de la rive (Masson et al., 2004).

La quantification précise des flux solides (et des radionucléides associés) en transit vers la mer nécessite toutefois de prendre en considération, (1) les flux en suspension (OPERA) mais également les flux transférés par charriage (transit de fond), et (2) l'ensemble de la section mouillée (Antonelli et al., 2004 ; 2005). Ceci a été particulièrement souligné lors du séminaire de l'Observatoire de Recherche en Environnement ORE/RESYST, auquel le laboratoire est associé, dédié aux « Flux solides du Rhône », tenu le 31 janvier 2006 sur le site de Cadarache (cf CRR du 03/03/2006).

L'évaluation des flux en transit par charriage est réalisée au moyen d'une bouteille Delft en collaboration avec le CEREGE. Une première campagne de mouillage a été réalisée début juillet 2006. A ce jour des difficultés techniques pour la mise en place de cette instrumentation subsistent.

L'homogénéité des flux sur la section a fait l'objet d'une campagne avec mouillage de 3 ADCP du 19 au 21 septembre 2006 en collaboration avec le CEREGE, la CNR et le CEMAGREF de Lyon. Près de 150 échantillons d'eau ont été collectés, associés à une dizaine de profils de vitesse (maille de 10 cm). L'évaluation de l'homogénéité des flux solides en régime de crue est limitée par les restrictions de navigabilité sur le fleuve. Les premiers résultats ont permis d'appréhender l'hétérogénéité des flux solides en transit au droit de la station Observatoire du Rhône SORA (Figure 4) et de préciser l'exportation des masses sédimentaires par le Petit Rhône (Figure 5).

Les données acquises lors des inondations de décembre 2003 constituent, à défaut d'occurrence d'un nouvel aléas inondation, un travail de référence pour EXTREME (Eyrolle et al., 2004).

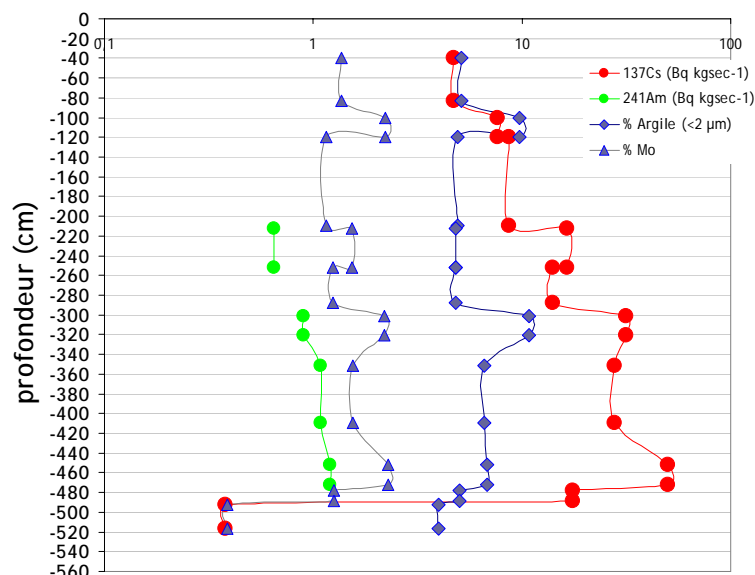


Figure 3: Etude des dépôts sédimentaires sur berge, Fourques, Rive droite du Rhône.

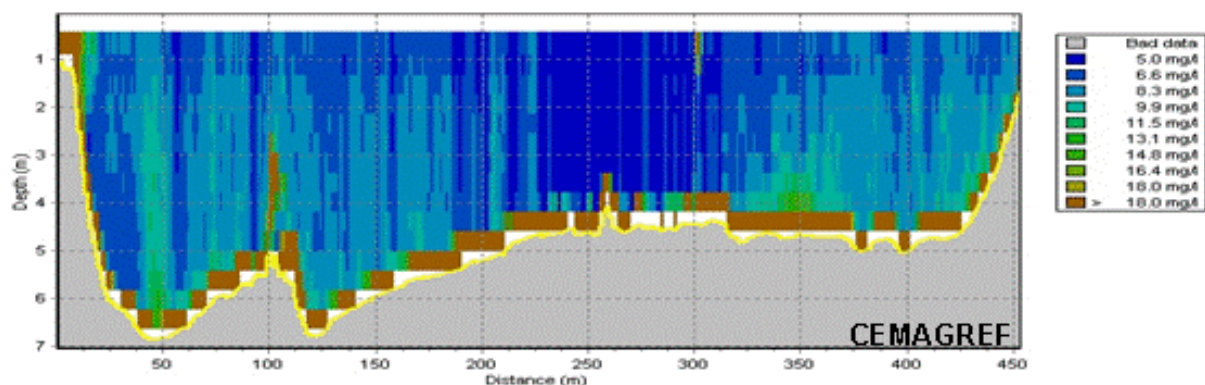


Figure 4: Variabilité de la charge solide sur la section mouillée du Grand Rhône (Arles) observée pour un débit de $1180 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, d'après Raccasi et al., 2006.

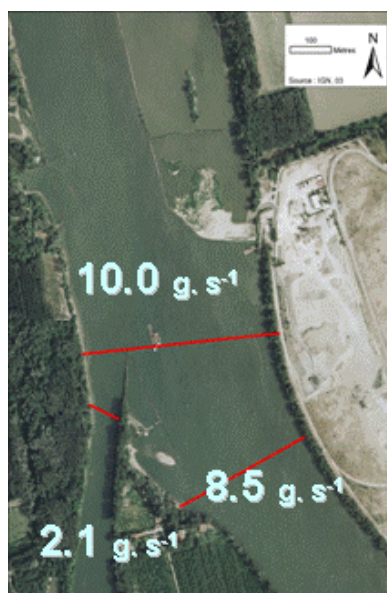


Figure 5: Partition des flux solides du Rhône à la diffluence Grand Rhône- Petit Rhône, d'après Raccasi et al., 2006.

3.3.2 En milieu marin

Au débouché du Rhône, le prodelta représente une zone d'accumulation majeure des apports de radioactivité du fleuve avant le transit plus au large des corps sédimentaires vers le plateau continental de l'ensemble du Golfe du Lion puis les canyons en marge du plateau essentiellement par transfert des corps sédimentaires. Une thèse est actuellement en cours au SESURE/LERCM sous la direction du CEFREM afin de préciser la dynamique des transferts particuliers de radioéléments d'origines anthropique et naturelle dans le Golfe du Lion (Marion, 2006). Les forçages par les crues mais également par les tempêtes sont à l'origine de redistributions drastiques des masses sédimentaires tout particulièrement celles du prodelta rhodanien, comme

cela a été mis en évidence par les études réalisées à la suite de l'épisode de crue majeure de décembre 2003 (Miralles et al, 2006).

A ce jour un seul déploiement d'ADCP (courantomètre à effet Doppler permettant outre la détermination des vitesses et direction des courants dans la colonne d'eau, d'estimer la turbidité) a été réalisé avec succès par l'IRSN et la société Thetis du 29 avril au 2 mai 2002 dans le cadre de la thèse de B. Lansard (2005) durant la campagne RHONAWAC sur des fonds de 16 m à proximité immédiate de l'embouchure du Grand Rhône (bouée Roustan Est) (Figure 6). Les maxima de turbidité enregistrés début mai sur toute la colonne d'eau sont dus à une augmentation du débit du Rhône (Figure 7). Des phénomènes de remises en suspension des sédiments ont été mis en évidence notamment lors de coups de vents marins (secteur sud-est) autour du 9 mai et du 23 mai. Il est à noter que pour ces périodes, les courants de fond sont dirigés vers le sud-ouest. Dans ces conditions la translocation des sédiments remis en suspension se fera préférentiellement dans cette direction. Il est possible que l'augmentation du signal de turbidité le 28 mai soit à relier au fort coup de Mistral observé à cette date (rafales à plus de 90 km.h⁻¹), mais cet événement n'a pas généré une augmentation significative de la vitesse des courants et il est possible que la turbidité observée puisse être due à des phénomènes de remises en suspension sur le flanc sud-ouest du prodelta. Ces matières auraient pu être ensuite rabattues vers le point de mesure par les courants de fond dirigés vers le nord-est. Cependant, ces mesures ont montré que pour une force de vent similaire, les vents de sud-est créent une contrainte sur le fond 3 fois plus importante que celle générée par le Mistral. Ceci souligne l'importance des vents et des houles de secteur marin dans la dynamique sédimentaire face à l'embouchure du Rhône et leur implication dans l'érosion et la translocation des sédiments du prodelta du Rhône.

Dans le cadre du projet inter-régional Midi Pyrénées-PACA, CARMA, une instrumentation mettant en jeu 2 appareillages ADCP et 6 altimètres a été mise en place en novembre 2006 pour une période de six mois afin de préciser le fonctionnement hydro-sédimentaire de cette zone en fonction des événements. Les premiers résultats sont attendus pour 2007 (Arnaud, 2007).

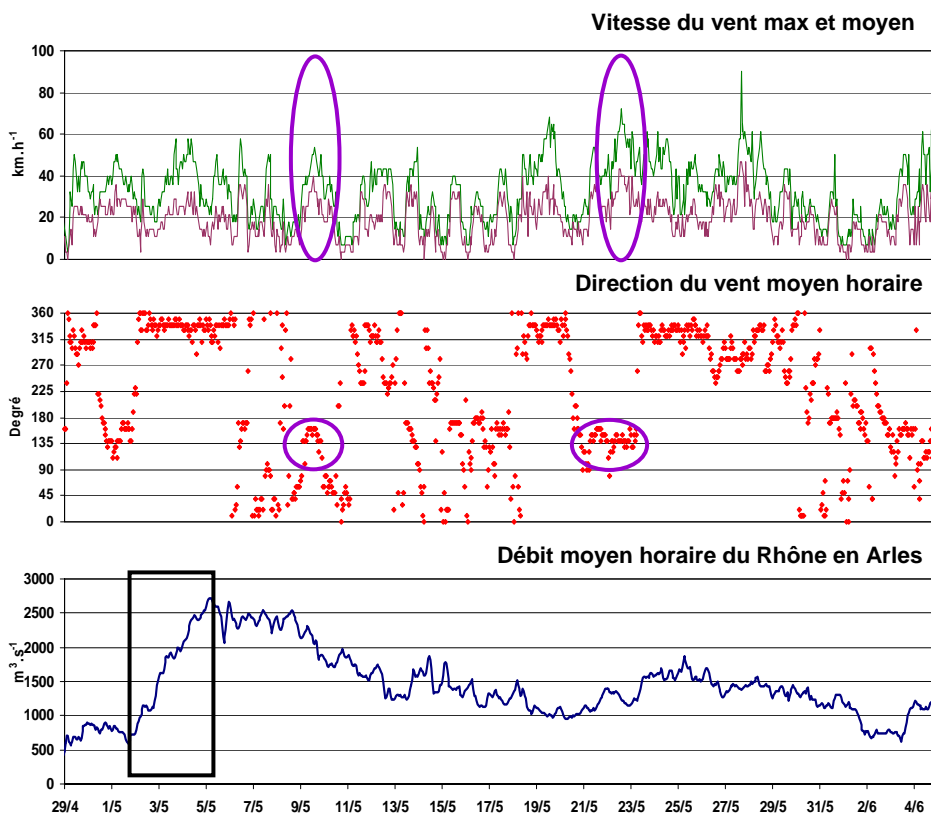


Figure 6: Vitesse et direction des vents relevés à Port de Bouc par Météo France et débit du Rhône en Arles enregistrés par la CNR durant la campagne RHONAWAC

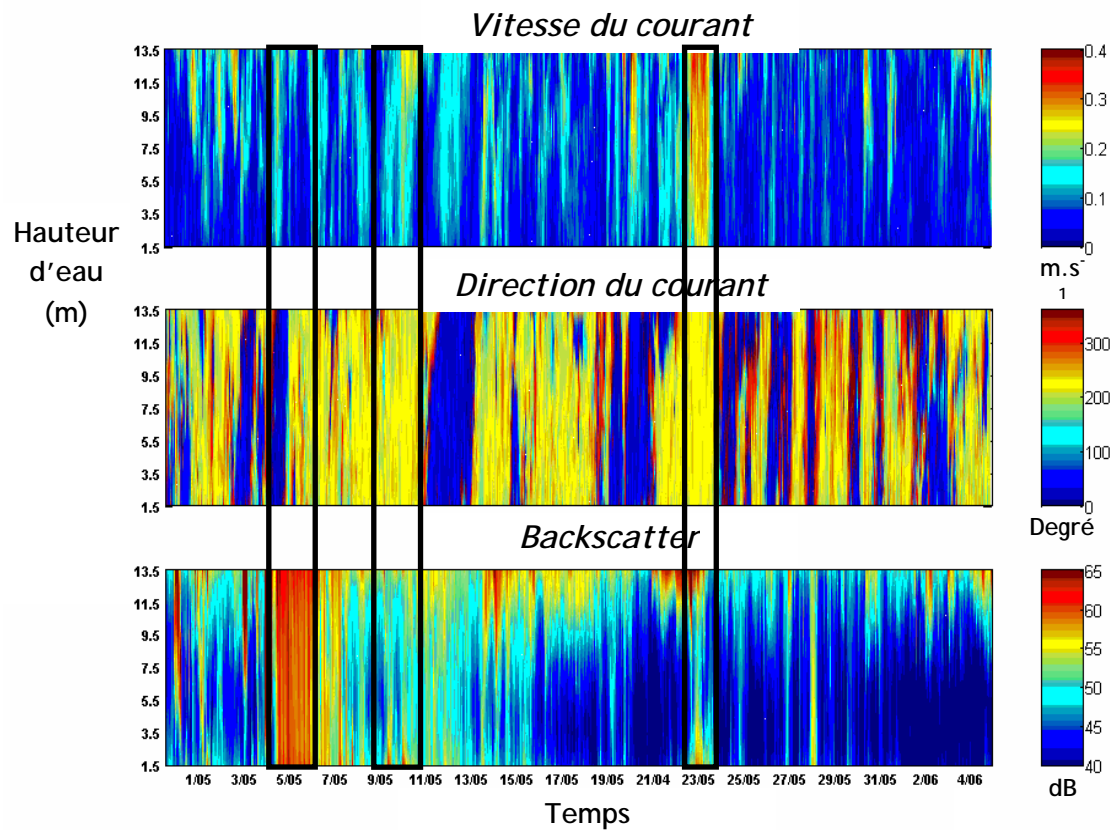


Figure 7: Courant et signal rétrodiffusé (lié à la turbidité) mesurés par ADCP devant le Rhône durant la campagne RHONAWAC (29 avril - 2 Mai 2002), Lansard(2005).

4 Valorisation scientifique

Les résultats obtenus dans le cadre du projet EXTREME ont fait l'objet de publications scientifiques, communications à congrès, communications publiques, rapports et séminaires. L'échange d'étudiants et de docteurs a notamment permis de conforter les collaborations avec nos partenaires scientifiques. EXTREME figure sur le site scientifique de l'IRSN à la rubrique 'programmes de recherche' depuis juillet 2006. Cet espace, présentant les objectifs et enjeux du projet, est régulièrement alimenté par les produits du projet. Les références de ces actions sont reportées ci après.

4.1 Thèses IRSN support

LANSARD B., 2005 : Distribution et remobilisation du plutonium dans les sédiments du prodelta du Rhône (Méditerranée Nord- Occidentale), Univ. Aix Marseille II, 180p (rapport SESURE 2005-12).

- 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.
- BOURCIER L., 2005-2008, Etude événementielle du lessivage des radionucléides et des aérosols dans l'atmosphère. Thèse de l'université Blaise Pascal Clermont-Ferrand. Cofinancement ADEME.
- DUFOIS F., 2004-2007 : Modélisation du transport particulaire et des traceurs radioactifs dans le Golfe du Lion. Université de Toulon, cofinancement région PACA
- MARION C., 2006-2009, Dynamique et bilan des transferts particulaires de radioéléments d'origine anthropique et naturelle dans le Golfe du Lion : cas particulier des apports rhodaniens. Université de Perpignan, financement IRSN

4.2 Post doctorat IRSN support

- ANTONELLI C. (2004-2005), Calibration des flux de radioactivité mesurés par la station observatoire du Rhône.
- MIRALLES J. (2004-2005), Etudes du devenir des apports fluviaux particulaires de ⁷Be, ¹³⁷Cs et ²¹⁰Pb dans le Golfe du Lion (Mer Méditerranée)

4.3 Publications dans des Revues scientifiques

- ANTONELLI C., EYROLLE F., ROLLAND B. et PROVANSAL M. and SABATIER F., 2007, Suspended sediment and artificial radionuclide fluxes during exceptional floods. Case study: The Rhone River (SE France) in December 2003, *Geomorphology*, accepté.
- ARNAUD M., CHARMASSON S., EYROLLE F. ANTONELLI C., 2006, Les radionucléides artificiels du Rhône à la mer Méditerranée: Sources, puits et devenir, Les Editions du CNRS, accepté.
- EYROLLE F., CHARMASSON S. and LOUVAT D., 2004, 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., LOUVAT D., METIVIER J.M. et ROLLAND, 2005, Origins and levels of artificial radionuclides within the Rhône River waters (France) for the last Forty years: Towards an evaluation of the radioecological sensitivity of river systems, *Radioprotection*, 40, 4, 435-446.
- EYROLLE F., ROLLAND B., ANTONELLI C. et METIVIER J.M., 2006, Radioactivité artificielle dans les eaux du Rhône aval - Conséquences des crues sur les niveaux d'activité des eaux et sur les flux à la mer, *Environnement Risques et santé*, 5, 2, 83-92.
- EYROLLE F., DUFFA C., ROLLAND B., ANTONELLI C. ET 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.
- LANSARD B., GRENZ C., CHARMASSON S., SCHAAF E. et PINAZO C., 2006, Potential plutonium remobilisation linked to marine sediment re-suspension : First estimates based on flume experiments, *Journal of Sea Research*, 55, 1, 74-85.
- MIRALLES J., ARNAUD M., RADA KOVITCH O., MARION C. AND CAGNAT X, 2006, Radionuclide deposition in the Rhône River Prodelta (NW Mediterranean Sea) in response to the December 2003 extreme flood, *Marine Geology*, 234, 179-189.
- PROVANSAL M., EYROLLE F., VILLIET J., RACCASI G., RADA KOVITCH O. et GURRARIAN R., Use a multi-proxy flood record to estimate recent sedimentation rate on a managed river banks (south Rhône River, France), *Geomorphology*, en preparation.
- ROLLAND B., EYROLLE F., BOURLES D., 2006, Transfert des Radionucléides artificiels par voie fluviale : Conséquences sur les stocks sédimentaires et les exports vers la Méditerranée, *Radioprotection*, 41, 2, 6-8.

4.4 Participation à congrès

- ANTONELLI C., EYROLLE F., ROLLAND B., PROVANSAL M. and SABATIER F., 2005, Suspended sediment and associated radioactivity fluxes during an exceptional flood. The case of the Rhône River (SE France) in December 2003, "The fluvial system - past and present dynamics and controls," Conference hosted by the Department of Geography, Bonn, Germany, May 16-22, 2005.
- ANTONELLI C., EYROLLE F., ROLLAND B., PROVANSAL M., SABATIER F., 2005, Suspended sediment and associated radioactivity fluxes during an exceptional flood. The case of the Rhone River (SE France) in December 2003, EUROSTRATAFORM-PROMESS Joint Meeting, Salamanca, Spain, 24-27 October 2005.
- ANTONELLI C., ROLLAND B and EYROLLE F., 2004, Calibration of the radionuclide fluxes of the Rhône River measured by the Arles Observatory Station (SE France), The 30th Congress of the International Geographical Union « One Earth, Many Worlds », 15-20 august 2004, Glasgow, UK.
- BOURCIER L., MASSON O., 2006, Influence of the lift-off and transport on the activity in altitude'' International conference in celebration of the 75th anniversary of the High Altitude Research Station Jungfrauoch - Interlaken, Switzerland, September 11-14, 2006
- CHARMASSON S., EYROLLE F., ARNAUD M., THEBAULT H., 2004, Les isotopes radioactifs émetteurs gamma traceurs des apports du Rhône en Méditerranée. Colloque Rhône Colloque de Synthèse sur le Rhône et la Méditerranée, 5-7 mai 2004, Marseille, France. Proceedings.
- EYROLLE F., 2006, Projet EXTREME, Colloque de radioécologie IRSN-EDF du 23 juin 2006, Maison d'Hôtes de Cadarache.
- EYROLLE F., ANTONELLI C., DUFFA C. and ROLLAND B., 2005, The extreme flooding of the Rhône valley in December 2003 (South east France): Consequences on the translocation of sediments and the associated contaminants over the flooded areas, 10th International Symposium on the Interactions between sediments and water, Bled, Slovenia, 28August-2 Sept 2005.
- EYROLLE F., DUFFA C., ROLLAND B. and ANTONELLI C., 2004, Translocation of artificial radioactive contaminants from the Rhône River during the large flood of December 2003, International Conference on Isotopes in Environmental Studies - Aquatic Forum, Monte Carlo, Monaco, 25-29 October 2004.
- EYROLLE F., DUFFA C., ROLLAND B., ANTONELLI C., LEPRIEUR F. and RENAUD Ph., 2004, La crue exceptionnelle du Rhône de décembre 2003 Conséquences sur la translocation des sédiments rhodaniens et des contaminants associés sur les zones inondées, Colloque de Synthèse sur le Rhône et la Méditerranée, 5-7 mai 2004, Marseille, France.
- EYROLLE F., ROLLAND B. and LOUVAT D., 2004, Radioecological sensitivity indicators within continental aquatic sytem : An estimation based on a long-term chronological series of ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs activities within the Rhône River waters (France), 11th International Congress of the International Radiation Protection Association - 23-28 May 2004, Spain, Madrid.
- EYROLLE F., ROLLAND B., ANTONELLI C. ET DUFFA C., 2005, Les sédiments du Rhône : Terme puits et terme source de radioactivité artificielle, 2^{ème} journée thématique de la ZABR : « Les sédiments du Rhône : Grands enjeux, premières réponses, Valence, 10 juin 2005.
- LANSARD B., CHARMASSON S., GRENZ C., 2005, Tracing the dispersion of particles from the Rhone River to the Gulf of Lions using plutonium isotopes. Oral presentation, ASLO Summer Meeting, 19-24 June 2005, Santiago de Compostella, SPAIN.
- LANSARD B., GRENZ C., CHARMASSON S., 2004, Utilisation des isotopes du plutonium comme traceur des apports solides du Rhône en Méditerranée : application à la zone prodeltaïque Colloque de Synthèse sur le Rhône et la Méditerranée, 5-7 mai 2004, Marseille, France. Proceedings.
- MASSON O, CAUTENET G., 2005, Radioecolical impact of saharan dust fallout. - Study of a major event over south part of France in February 2004. First Symposium ACCENT. The Changing Chemical Climate of the atmosphere, Urbino, 12-16 septembre 2005.
- MASSON O, MICHAUD L. 2004. Radionucléides artificiels en phase dissoute dans le Rhône aval. Colloque de Synthèse sur le Rhône et la Méditerranée, 5-7 mai 2004, Marseille, France.
- MASSON O, SAEY L., PAULAT P., BOIS E., 2005, Etude événementielle du lessivage de l'atmosphère. Congrès SFRP, Nantes 14-16 juin 2005.

- MIRALLES J., MAILLET G., VELLA C., RADA KOVITCH O., ARNAUD M., 2005, Sedimentary features in the Rhône River Prodelta from radionuclide analysis and bathymetric evidences. Poster ASLO Summer Meeting, 19-24 May 2005, Santiago de Compostella, SPAIN
- RACCASI G., 2007, Retour d'expérience d'une première campagne multi aDcp sur le Rhône aval - Quantification de la répartition des flux entre Grand et Petit Rhône , Journée des Jeunes Géomorphologues , Paris, 19 janvier 2007.
- ROLLAND B., ANTONELLI C., EYROLLE F., ARNAUD M., CHARMASSON S., MORELLO M. and BOUISSET P., 2005, Suspended sediment fluxes and associated ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239;240}\text{Pu}$, ^7Be and $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ from the Rhône river towards the Mediterranean Sea over the 2002-2004 period, EUROSTRATAFORM-PROMESS Joint Meeting, Salamanca, Spain, 24-27 October 2005.
- ROLLAND B., C. ANTONELLI and F. EYROLLE, 2004, Fluxes of suspended material and associated radionuclides to the sea during flood events of the Rhône River, Proceedings of the ECORAD 2004 international symposium, 6-10 sept. 2004, Aix en Provence, France, P3, 35.
- ROLLAND B., EYROLLE F. and BOURLÈS D., 2004, Removal of sedimentary stocks and associated radioactivity in the lower Rhone River : preliminary results, 26-30 april 2004, EGS Nice.
- ROLLAND B., EYROLLE F. and BOURLÈS D., 2004, The significance of floods in the transfer of suspended matter and associated radioactivity from the Rhône River toward the Mediterranean Sea, International Conference on Isotopes in Environmental Studies - Aquatic Forum, Monte Carlo, Monaco, 25-29 October 2004.
- ROLLAND B., EYROLLE F. and BOURLÈS D., 2005, Significance of floods in the transfer of artificial radionuclides from the Rhône River towards the Mediterranean Sea, 10th International Symposium on the Interactions between sediments and water, Bled, Slovenia, 28 August-2 Sept 2005.
- ROLLAND B., EYROLLE F. et BOURLÈS D., 2004, 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. Le Rhône et la Méditerranée : approche scientifique et gestion socio-économique ». Textes du colloque de synthèse « Rhône - Méditerranée », Marseille les 4-6 mai 2004, publié par le Centre d'Océanologie de Marseille (Université de la Méditerranée, C.N.R.S.), éditeurs G.Gontier, D. Marty, M. Harmelin et I. Dekeyser, 300 pages.

4.5 Rapports internes

- ANTONELLI C., EYROLLE F., 2005, Les flux de matières en suspension et de ^{137}Cs dans le Rhône à Arles durant la crue exceptionnelle de décembre 2003, Rapport IRSN/DEI/SESURE/05-30.
- ANTONELLI C., EYROLLE F., MASSON O., 2007, Évaluation des flux de radioactivité mesurés dans le Rhône - Station OPERA-Arles, Rapport DEI/SESURE n°2007- .
- ARNAUD M., 2007, Le projet CARMA en 2006, Rapport IRSN/DEI/SESURE 2007-22.
- EYROLLE F. et ROLLAND B., 2004, Radioactivité artificielle dans les eaux du Rhône aval - Conséquence des crues sur les niveaux d'activité des eaux et sur les flux à la mer -Bilan 2000-2003, Rapport IRSN/DEI/SESURE/04-16.
- EYROLLE F., CHARMASSON S. et MASSON O., 2005, Projet EXTREME - Rapport de lancement, Rapport IRSN/DEI/SESURE/05-07.
- EYROLLE F., DUFFA C., LEPRIEUR F., ROLLAND B., ANTONELLI C., MARQUET J., SALAUN G. et RENAUD Ph., 2004, 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.
- LEPRIEUR F., MASSON O. 2004. Résultats des mesures complémentaires aux plans de surveillance des installations nucléaires de base de la vallée du Rhône suite à la crue de décembre 2003. Rapport IRSN/DEI/SESURE/04-11.
- MASSON O, POURCELOT L., GURRIARAN R., PAULAT P., 2005 , Impact radioécologique des retombées de poussières sahariennes. Rapport IRSN/DEI/SESURE/05-04.
- MASSON O, SAEY L., PAULAT P., PIGA D., LEROUX G., BOURCIER L., CAGNAT X., 2006, Relation entre l'origine des masses d'air et l'activité en ^{137}Cs dans les aérosols en France, de 2000 à 2006. Rapport IRSN/DEI/SESURE 2006-47.

4.6 Ateliers / Séminaires

Atelier Expérimentation et Instrumentation CNRS / INSU / IFREMER, L'Observatoire Permanent de la Radioactivité de l'environnement (réseau OPERA) de l'IRSN. Paris, 27 avril 2004.

Séminaire MEDICIS : IFREMER, La station IRSN d'Arles, 12-13 octobre 2005 , Toulon.

Séminaire IFR 112 - CEREGE - IRSN, Les poussières sahariennes, 2 juin 2005, Europole de l'Arbois.

Atelier de l'Observatoire Régional de l'Environnement RESYST, Les Flux du Rhône - Données et incertitudes, 31 janvier 2006, Cadarache.

5 collaborations

| | Echanges de données | Echanges de moyens humains et matériels | Thèses et Post Doc | Séminaires /Réunions | Publications communes |
|---|---------------------|---|--------------------|----------------------|-----------------------|
| CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement - Université Paul Cézanne Aix-Marseille III CNRS UMR 6635) | X | X | X | X | X |
| COM (Centre Océanologique de Marseille) | X | X | | X | |
| CNR (Compagnie Nationale du Rhône) | X | X | | X | |
| CEMAGREF | X | X | | X | |
| Université de Clermont Ferrand | X | X | X | X | |
| Université de Toulon et du Var (LEPI) | X | X | | X | |
| Tour du Vallat (Centre de recherche privé pour la conservation des zones humides méditerranéennes) | X | | | X | |
| IFREMER | X | X | X | X | |
| CEFREM (CEntre de Formation et de Recherche sur l'Environnement Marin - Université de Perpignan CNRS UMR 5110) | X | X | | X | |
| Laboratoire d'Aérodologie du Pôle d'Océanographie Côtière de l'Observatoire Midi-Pyrénées (Université de Toulouse CNRS UMR 5560). | X | | | X | |

6 Conclusions

En 2006, l'IRSN a pu intéresser plusieurs partenaires aux objectifs d'EXTREME, ce qui s'est traduit par la définition des affaires CARMA et EXTREMA.

L'affaire CARMA, financée par les régions PACA et Midi pyrénées, par l'agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse ainsi que par le Fond Européen de Développement Régional (FEDER), est ciblée sur l'étude des transferts sédimentaires depuis le débouché du Rhône vers plateau continental du Golfe du Lion.

L'affaire EXTREMA, piloté par l'IRSN et dont le financement a été accepté par l'ANR, va au-delà du projet EXTREME avec des thématiques supplémentaires : la prise en compte des métaux, les transferts via les canyons sous marins. Elle couvre ainsi quatre milieux : atmosphérique, fluvial milieu marin côtier et milieu marin profond. EXTREMA a été labellisé par les pôles de compétitivité Mer Paca et Gestion des risques et Vulnérabilité des territoires.

Ces deux affaires réunissent les principaux laboratoires régionaux compétents sur cette thématique.

Le projet EXTREME a en outre été intégré au pôle fédératif de recherche ECCOREV. Il a donné lieu à 10 publications, 24 présentations à congrès et 9 rapports. De plus, 5 doctorants et 2 post doctorants y ont été associés.

A partir de 2007, le projet EXTREME sera piloté au travers des affaires CARMA et EXTREMA, notamment en terme de rapports d'avancement. Enfin, EXTREME et ses deux affaires constitutives porte pour les 4 prochaines années l'action 2 du projet 3-1-2 du Plan à Moyen et Long Terme de l'IRSN.

7 Références citées

- Antonelli C., 2004, Rapport intermédiaire de post-doctorat, Rapport IRSN/DEI/SESURE 2004-15.
- Antonelli C., 2005, les flux du Rhône à la mer durant la crue exceptionnelle de décembre 2003 - Contribution au projet EXTREME, Rapport IRSN/DEI/SESURE 2005-30.
- Antonelli C., Eyrolle F., Masson O., 2007, Évaluation des flux de radioactivité mesurés dans le Rhône - Station OPERA-Arles, Rapport DEI/SESURE n°2007- .
- Arnaud M., 2007, Le projet CARMA en 2006, Rapport IRSN/DEI/SESURE 2007-22.
- CARMA, Conséquences des apports rhodaniens sur le milieu littoral associé : cas des évènements extrêmes, Programme Inter-Régionale Midi-Pyrénées & Provence Alpes Côte d'Azur 2005-2006, Contrat 2005-19526/19527. 48 pp.
- CARMA, Conséquences des apports rhodaniens sur le milieu littoral associé : cas des évènements extrêmes, Programme Inter-Régionale Midi-Pyrénées & Provence Alpes Côte d'Azur 2005-2006, Contrat 2005-19526/19527, 2^{ème} année.
- Duffa C. et Renaud Ph., 2004, Projet CAROL Rapport final, Rapport IRSN/DEI/SESURE 2004-22.
- Eyrolle F., Charmasson S. et Masson O., 2005, Projet EXTREME - Rapport de lancement, Rapport IRSN/DEI/SESURE/05-07.
- GEWEX, Global Energy and Water Cycle Experiment, Program initiated by the World Climate Research Programme (WCRP)
- GICC, Gestion et Impacts du Changement Climatique, programme du MEDD initié en 1999.
- Guillaume RACCASI et Groupe Doppler (CEREGE, CEMAGREF, CNR, COM, IRSN), 2007, Retour d'expérience d'une première campagne multi aDcp sur le Rhône aval Quantification de la répartition des flux entre Grand et Petit Rhône, Présentation aux Journées des Jeunes Géomorphologues, Paris, 19 janvier 2007.
- IMFREX, Impact des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent, de température et de précipitation, programme du GICC APR 2002.
- Maillet G., 2007, Sensibilité radioécologique des berges - Apports de la géomorphologie à la détermination des facteurs de sensibilité radioécologique des berges - SENSIB volet Fluvial, Rapport final de Post-Doctorat IRSN/DEI/SESURE 2007-20.
- Marion C., 2006, Dynamique et bilan des transferts particuliers de radioéléments d'origines anthropique et naturelle dans le Golfe du Lion: cas particulier des apports rhodaniens, Présentation aux Journées des thèses de l'IRSN, La Colle sur Loup, 25-27 septembre 2006.
- Masson O., Eyrolle F., Antonelli C., Rolland B. et Boullier V., 2004, La Station observatoire 'Rhône aval' du Réseau OPERA - Fonctionnement de 2000 à 2003 et perspectives, Rapport IRSN/DEI/SESURE 2004-05.
- Miralles J., Arnaud M., Radakovitch O., Marion C. and Cagnat X, 2006, Radionuclide deposition in the Rhône River Prodelt (NW Mediterranean Sea) in response to the December 2003 extreme flood, Marine Geology, 234, 179-189.

ORE/RESYST (Réponse d'un SYSTème deltaïque aux forçages externes), programme CNRS avalisé par le Ministère de la Recherche en 2002.

ORME, Observatoire Régional Méditerranéen de l'Environnement du Programme Environnement Vie et Sociétés du CNRS, initié en 2000.

PIGB, Programme International Géosphère-Biosphère, initié en 1998.

Provansal M., Eyrolle F., Villiet J., Raccasi G., Antonelli C. and Radakovitch O., Use a multi-proxy flood records to estimate recent sedimentation rate on a managed river bank (south Rhône River, France), en preparation pour the Science of the Total Environment;

Provansal M., Eyrolle F., Villiet J., Raccasi G., Radakovitch O. et Gurrarian R., Use a multi-proxy flood record to estimate recent sedimentation rate on a managed river banks (south Rhône River, France), Geomorphology, en preparation.

Raccasi G., 2007, Retour d'expérience d'une première campagne multi aDcp sur le Rhône aval - Quantification de la répartition des flux entre Grand et Petit Rhône , Journée des Jeunes Géomorphologues , Paris, 19 janvier 2007.

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 (Thèse IRSN 2006/66-FR).

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, in press.

WCRP, Programme Mondial de Recherches sur le Climat, initié en 1980.