

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Le projet CARMA en 2006

ARNAUD M.

**DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'INTERVENTION**

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

Le projet CARMA en 2006

Laboratoire d'Étude Radioécologique du milieu Continental et Marin

Rapport DEI/SESURE n° 2007 - 22

	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur	Chef du SESURE	Directeur DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	M.ARNAUD	P.RENAUD	J.M. PERES	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	04/05/07	10/05/07	31/05/07		
Signatures					

Résumé

Le projet CARMA a pour objectif l'instrumentation du débouché du Rhône en vue de l'évaluation des conséquences des crues et des tempêtes sur l'évolution du trait de côte et sur l'alimentation en matières particulaires du Golfe du Lion. Les applications sociétales de ce projet sont multiples : aménagement et conservation du littoral, protection des installations conchylicoles, évolution des pêcheries, gestion de la qualité des eaux..., comme en témoigne les différentes sources des cofinancements accordés (Régions Midi Pyrénées et PACA, Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et Fond Européen de Développement Régional (FEDER)). L'un des points forts du projet réside dans la synergie entre l'acquisition de mesures de terrain et la modélisation. Ce rapport rend compte des activités de la première phase du projet, de son acceptation à la mise en place de l'instrumentation dans le Rhône et à son embouchure.

Mots-clefs

RHONE – GOLFE DU LION – INSTRUMENTATION – COURANT – HOULE - EVENEMENTS EXTREMES – (CRUES – TEMPETES)

Ont contribué à cette étude :

Pour le Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale (LEGOS) de l'université de Toulouse : Claude ESTOURNEL

Pour la société Noveltis : Muriel LUX

Pour le Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE) de l'université d'Aix-Marseille : François SABATIER, Caroline VASSAS, Claude VELLA

Pour la société In-vivo Environnement : Philippe BORNENS

Pour la société Adhoc-vision : Eric WATTEL

Pour l'IRSN : Mireille ARNAUD, Sabine CHARMASSON, Hervé THEBAULT, Cédric MARION, François DUFOIS, Alain CHAMPELOVIER.

Pour le Centre Océanographique de Marseille (COM) : Patrick RAIMBAULT

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION.....	6
2 LES OBJECTIFS.....	6
3 LES ENJEUX.....	7
4 LE CONTEXTE.....	8
5 METHODOLOGIE	11
5.1 STRATEGIE	11
5.2 ORGANISATION DES TACHES.....	11
5.2.1 Typologie des crues et des tempêtes.....	11
5.2.2 Acquisition de données.....	11
5.2.3 Modélisation de l'érosion des dunes de la flèche de la Gracieuse	13
5.2.4 Estimation des apports sableux du Rhône aux plages limitrophes	14
5.2.5 Modélisation du transport des sédiments fins : influence des crues et des tempêtes	14
6 LES PARTENAIRES ET LEURS RÔLES.....	14
6.1 LES PARTENAIRES SCIENTIFIQUES :	14
6.1.1 POC (Midi-Pyrénées)	14
6.1.2 CEREGE (PACA).....	14
6.1.3 IRSN/LERCM (PACA)	15
6.2 LES PARTENAIRES INDUSTRIELS :	15
6.2.1 NOVELTIS (Midi-Pyrénées)	15
6.2.2 IN VIVO ENVIRONNEMENT (PACA)	15
6.2.3 ADHOC VISION (PACA).....	16
7 MATERIEL ACQUIS DANS LE CADRE DU PROJET	16
7.1 ADCP (ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER).....	16
7.2 ALTIMETRES	17
7.3 SONDAS MULTIPARAMETRES	18
7.4 ASSURANCES	19
8 INSTRUMENTATION DE L'EMBOUCHURE DU RHÔNE	19
8.1 ESSAIS.....	19
8.2 MISES A L'EAU	20
9 PREMIERS RESULTATS.....	20
9.1 INVENTAIRE DES EPISODES DE CRUE DU RHONE	20
9.2 FLUX DE MATIERES EN SUSPENSION ET DE POLLUANTS RADIOACTIFS LORS DES CRUES	21
9.3 ACQUISITION DE PROFILS BATHYMETRIQUES ET TOPOGRAPHIQUES.....	22
9.4 SIMULATION DES EVENEMENTS EXCEPTIONNELS DE L'HIVER 2003-2004	24
10 - RESULTATS ET ACTIONS A VENIR.....	25
11 LISTE DES DOCUMENTS SUPPORTS	25

FIGURES

Fig. 1 : Situation de la zone à proximité de l'embouchure du Rhône.....	7
Fig. 2 : Implantations des différentes installations à proximité du Golfe de Fos.	8
Fig. 3 : Courant et rétrodiffusion (liée à la turbidité) mesurés par ADCP devant le Rhône en Mai 2002.	9
Fig. 4 : Position des stations instrumentées à l'embouchure du Rhône.	12
Fig. 5 : Positionnement des stations instrumentées dans le Rhône.	13
Fig. 6 : ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) muni d'un module de houle.	17
Fig. 7 : L'altimètre « ALTUS ».	18
Fig. 8 : Représentation des 2 sondes multiparamétriques.	19
Fig. 9 : Schéma d'implantation des altimètres dans le milieu marin	20
Fig. 10 : Débit du Rhône ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) sur la période 2002-2006 (données de la CNR).	21
Fig. 11 : Localisation des profils bathymétriques dans le Rhône, à l'embouchure et le long de la Flèche de la Gracieuse	22
Fig. 12 : Evolution des profils transversaux du Rhône (profils C3 et C8) entre novembre 2003 et février 2006	23
Fig. 13 : Evolution des profils P1 et P4 entre janvier et mars 2006.....	23
Fig. 14 : Chronologie du dépôt et de l'érosion sédimentaire au cours de l'hiver 2003-2004.....	24

TABLEAU

Tableau 1 : Flux de matières en suspension et de radioéléments (dissous+particulaires) vers la mer Méditerranée sur la période 2002 à 2005.	22
---	----

ANNEXES

ANNEXE 1 : FINANCEMENT DU PROJET	28
ANNEXE 2 : DEPENSES ENGAGEES PAR L'IRSN POUR LE PROJET	29
ANNEXE 3 : COORDONNEES DES PARTENAIRES DU PROJET.....	30
ANNEXE 4 : PLANNING DU PROJET.....	31
ANNEXE 5 : SCHEMAS D'IMPLANTATION DES MOUILLAGES NECESSAIRES AUX ADCP	33
ANNEXE 6 : COORDONNEES DES STATIONS INSTRUMENTEES	34
ANNEXE 7 : QUELQUES PHOTOS DES INTERVENTIONS SUR LE TERRAIN	35

1 INTRODUCTION

Dans le cadre d'un appel d'offre interrégional Midi-Pyrénées/PACA, l'IRSN s'est associé à deux organismes de recherche le Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE) de l'université d'Aix-Marseille et le Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale (LEGOS) de l'université de Toulouse, afin d'élaborer un projet sur le thème du « développement des zones littorales en vue d'une maîtrise harmonieuse du développement des zones situées à moins de 50 km des côtes - mesures et modélisation (gestion des risques, surveillance et contrôle des environnements) ».

Ce projet, dénommé CARMA, a pour objectif l'instrumentation de l'embouchure du Rhône en vue de l'évaluation des conséquences des crues et des tempêtes sur l'évolution du trait de côte et sur l'alimentation en matières particulaires du Golfe du Lion.

Les applications sociétales de ce projet sont multiples : aménagement et conservation du littoral, protection des installations conchylicoles, évolution des pêcheries, gestion de la qualité des eaux..., comme en témoigne les différents cofinancements accordés.

Le montant total de ce projet est estimé à 583,5 k€ sur deux ans. Son financement est assuré à hauteur de :

- 89 k€ par la région PACA ;
- 48,5 k€ par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse ;
- 26,5 k€ par le Fonds Européen de Développement régional (FEDER) ;
- 70,5 k€ par la région Midi-Pyrénées ;
- 349 k€ par l'IRSN, le CEREGE et le POC.

La participation de l'Agence de l'eau se fait dans le cadre de sa politique de développement d'outils d'analyse et de diagnostic pour sa mission de gestion de l'eau et de lutte contre les pollutions.

Par ailleurs, le projet CARMA s'inscrit dans le cadre des études sur les conséquences du changement climatique. L'IRSN y apporte ses compétences dans l'utilisation des radionucléides comme traceurs des grands phénomènes naturels. Ce projet contribue ainsi au programme « EXTREME », de l'IRSN sur l'étude des conséquences des événements extrêmes notamment sur la redistribution des stocks de radionucléides naturels et artificiels.

La synergie entre l'acquisition de mesures de terrain et la modélisation, ainsi que la participation de trois PME, deux en région PACA (Adhocvision et In-Vivo Environnement) et une en région Midi-Pyrénées (Noveltis), constituent des points forts de ce projet.

Ce rapport rend compte des activités de la première phase du projet, de son acceptation à la mise en place de l'instrumentation dans le Rhône et à son embouchure.

2 LES OBJECTIFS

L'objectif principal du projet est la compréhension du fonctionnement hydrosédimentaire de la région sous influence des apports rhodaniens. Il s'agit d'appréhender les conséquences des crues et des tempêtes à la fois sur les profonds remaniements du littoral et sur le devenir des particules fines qui piègent la matière organique et les contaminants issus des diverses activités humaines. Pour cela on essaiera de comprendre et de quantifier la dynamique spatio-temporelle du devenir des apports du

Rhône en sables et particules fines en déterminant les voies de passage de la matière au sortir du fleuve, les zones de dépôt, les temps de résidence de ces dépôts, les flux érosifs et leur redistribution à savoir les flux exportés et redéposés. Cette approche sera réalisée en alliant mesures de terrain et modélisation, d'une part des aspects hydrodynamiques (courant et houle) et d'autre part, des phénomènes de sédimentation et de transport de la matière en suspension, les deux volets s'alimentant l'un l'autre.

La réponse des tempêtes en termes de remise en suspension est méconnue, tout comme l'évolution temporelle des propriétés physiques du sédiment (fraction sédimentée / exportée, enfouissement définitif ou remobilisation). Dans la mesure où les sédiments les plus fins sont liés aux contaminants et à la matière organique et que le développement des populations benthiques leur est fortement lié, modéliser de façon précise la dynamique de la région proche de l'embouchure du Rhône devient une priorité. Il faut souligner que cette action complète le travail entrepris dans le cadre de la thèse de F. Dufois cofinancée par la région PACA et l'IRSN dont le sujet est la modélisation du transport particulaire dans le panache du Rhône et le Golfe du Lion, et son application au devenir de traceurs radioactifs.

3 LES ENJEUX

Les intérêts économiques, industriels et patrimoniaux sont multiples dans les zones d'embouchures. Dans le cas du delta du Rhône, l'équilibre sédimentaire des plages constitue un enjeu majeur dans la protection des zones humides situées en arrière des cordons littoraux (Fig.1). Les zones humides de l'embouchure du Grand Rhône sont d'ailleurs à cet effet gérées en grande partie par le conservatoire du littoral sur le domaine de la Palissade en rive droite, mais aussi en rive gauche.

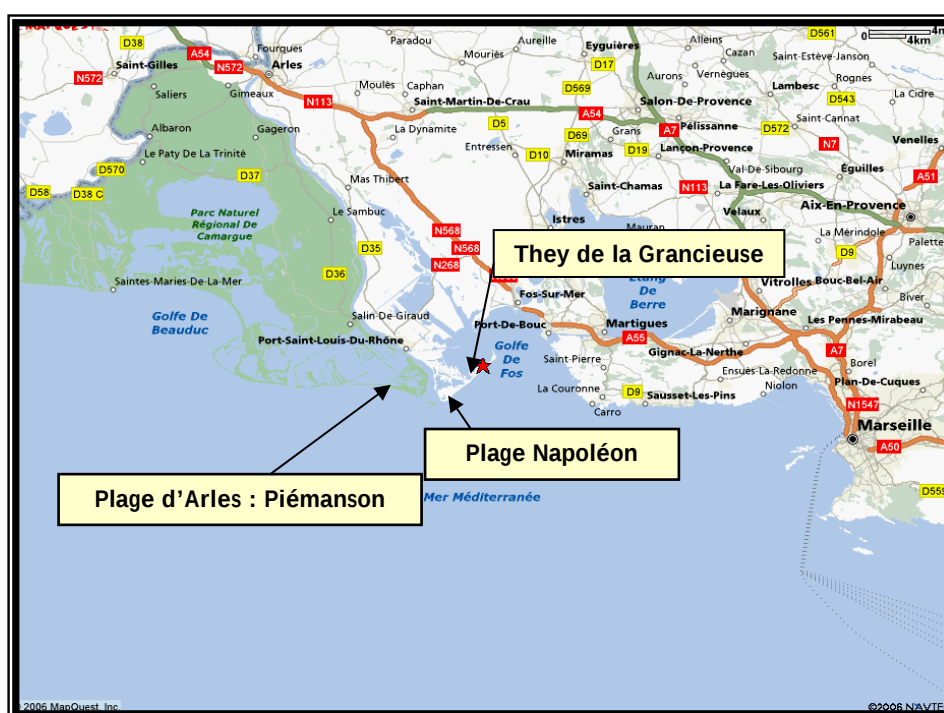


Fig. 1 : Situation de la zone à proximité de l'embouchure du Rhône.

La diminution des apports sédimentaires du Rhône, ainsi que leur très faible redistribution sur les plages limitrophes posent, depuis 30 ans, des problèmes importants de recul du rivage de la flèche de la Gracieuse. Cette dernière constitue la première protection contre les houles protégeant ainsi les installations industrialo-portuaires du Golfe de Fos, de Marseille, ainsi que les établissements de conchyliculture situés en arrière dans l'anse de Carteau (Fig.2). Les plages adjacentes à l'embouchure présentent un attrait important pour les activités de loisirs et de tourisme qui bénéficient aux villes d'Arles et de Port Saint Louis du Rhône.

Outre les problèmes d'évolution du trait de côte, le devenir des apports sédimentaires rhodaniens au niveau du Golfe du Lion est un paramètre important à connaître pour les gestionnaires du milieu notamment au regard des usages de ce domaine par les différents acteurs. La pêche, particulièrement développée au niveau du Golfe du Lion, est largement concernée par cet aspect. Que ce soit les ressources en palourdes essentiellement situées entre les deux bras du Rhône, les installations conchylicoles notamment implantées à Carteau dans le Golfe de Fos, et plus généralement les pêcheries de poissons benthiques type sole, plie, carrelet ou turbot, toutes sont sensibles à l'évolution du système sédimentaire associé aux apports du Rhône (Fig. 2).

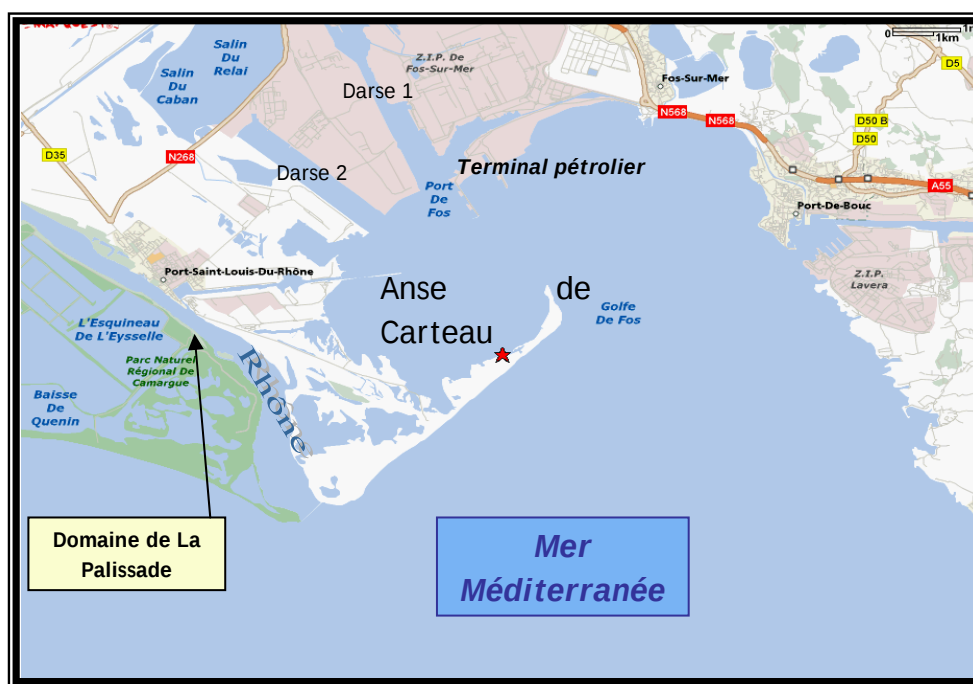


Fig. 2 : Implantations des différentes installations à proximité du Golfe de Fos.

4 LE CONTEXTE

Des programmes internationaux comme LOICZ (Land Ocean Interactions in the Coastal Zone) ont défini depuis une décennie des priorités sur l'étude du devenir des interactions entre continent et domaine marin. Depuis, les recherches se sont orientées plus particulièrement vers les marges dominées par les apports fluviaux et notamment celle située à proximité du Rhône, premier fleuve Méditerranéen.

Les apports du Rhône au niveau du Golfe du Lion structurent fortement les écosystèmes de la zone côtière et ce tant des points de vue biologique et hydrologique que sédimentaire. Les apports solides du

Rhône, notamment la charge sableuse, constituent un paramètre majeur de contrôle du bilan sédimentaire côtier et donc de l'évolution du trait de côte. Les particules les plus fines fixent préférentiellement les contaminants issus de l'agriculture et des rejets industriels et urbains. La majeure partie de ces apports de matériel fin se dépose en périphérie de l'embouchure par des fonds de l'ordre de 30 à 80 m dans une zone appelée prodelta.

Des études récentes ont montré que les flux de sable et de particules fines et par voie de conséquence les flux de contaminants associés se font essentiellement durant les périodes de crues du fleuve (Rolland, 2006).

Pourtant, paradoxalement, le Rhône a été étudié de manière très parcellaire et ne fait pas l'objet de mesures en continu dans le domaine marin permettant de comprendre son fonctionnement en réponse aux cycles et événements naturels. Cette absence de suivi du milieu rend impossible toute gestion de la zone littorale que ce soit en matière d'évolution de la côte ou en situation de pollution par voie fluviale. A titre de comparaison, les fleuves et les zones côtières influencées par la Seine ou le Rhin font l'objet de suivis continus des courants, de l'hydrologie des charges en suspension et des sels nutritifs.

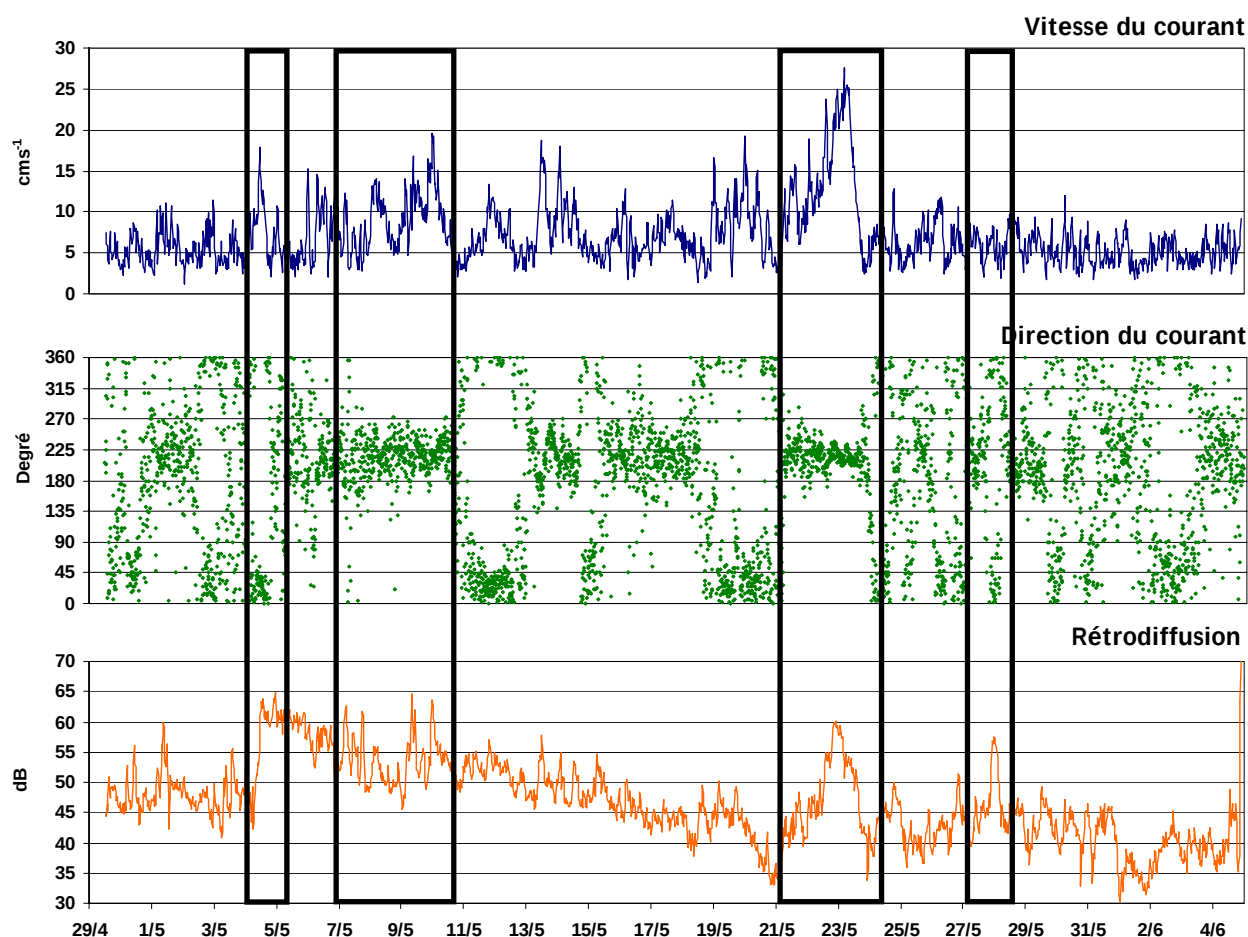


Fig. 3 : Courant et rétrodiffusion (liée à la turbidité) mesurés par ADCP devant le Rhône en Mai 2002.

Le maximum de turbidité enregistré sur toute la colonne d'eau du 2 au 5 mai est dû à une augmentation du débit du Rhône (de $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ le 2 mai à $2700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ le 5 mai). Les épisodes des 8 et 22-24 mai présentant un maximum de turbidité près du fond indiquent des remises en suspension liées à des coups de vent de secteur sud est. Le pic de turbidité enregistré le 28 mai est considéré comme un signal secondaire éphémère sans augmentation de courant ni de débit.

A ce jour un seul déploiement d'ADCP (courantomètre à effet Doppler) permettant d'estimer la turbidité liée à la quantité de matière en suspension, a été réalisé en collaboration IRSN-Thétis durant 1 mois (Lansard, 2004) à proximité de l'embouchure du Rhône. Des phénomènes de remise en suspension des sédiments sur des fonds de 16 m ont été mis en évidence notamment lors de coups de vent de secteur sud-est (Fig. 3). Une stratégie d'acquisition de données de plus grande amplitude spatiale et temporelle est maintenant nécessaire à une connaissance approfondie de l'impact de ces phénomènes.

Les tempêtes du large accompagnées de houle constituent également des événements extrêmes importants à étudier dans le cadre de la gestion de la zone côtière. L'agitation liée à ces houles et les courants importants qui peuvent être induits près de la côte par le vent soufflant en tempête peuvent déstabiliser les dépôts sédimentaires, éroder les plages de manière parfois spectaculaire, et remettre en suspension les sédiments fins (et les contaminants piégés) jusqu'à des profondeurs qui peuvent atteindre une cinquantaine de mètres.

Cette problématique est d'autant plus à l'ordre du jour que les années 2002 et 2003 ont été marquées par des crues record, tandis qu'on a compté 7 tempêtes (houle supérieure à 3 mètres) pendant la période d'octobre 2003 à avril 2004. Les travaux récents sur le changement climatique en Méditerranée (Météo-France) indiquent par ailleurs une évolution vers des hivers beaucoup plus doux avec une réduction des épisodes de Mistral et une augmentation des tempêtes au large. La montée du niveau marin irait également dans le sens d'une aggravation des crues dans les régions très plates telles que la Camargue.

Des mesures réalisées dans le cadre du programme européen EUROSTRATAFORM suite à la crue de décembre 2003, ont apporté quelques informations à la fois sur le bilan de sable de la région littorale et sur les sédiments fins apportés par le Rhône à la mer Méditerranée. En effet, le trait de côte à l'est de l'embouchure a été considérablement modifié et une accumulation sédimentaire très importante dans la zone 0-20 m a pu être mise en évidence ainsi que l'existence de structures de glissement et de chenaux qui constituent des voies préférentielles de transfert de matériel particulaire depuis le fleuve vers la zone au delà de 20 m (Maillet, 2006).

Dans la zone proche de l'embouchure, les premières observations de type sédimentologique et biologique concernant l'impact de la crue de décembre 2003 s'opposent à celles réalisées après les crues de 1994 et 2002. En effet, contrairement aux précédentes, cette crue survenue avec des conditions météorologiques particulières (forts vents d'est) n'a eu que très peu d'effet sur les communautés d'animaux benthiques qui colonisent les régions situées sur les fonds vaseux au sud du Rhône ainsi que sur les profils de certains paramètres géochimiques.

Du point de vue de la modélisation, des efforts importants ont été réalisés dans la région de la Méditerranée Nord-Occidentale que ce soit la plate-forme de modélisation mise en place par IFREMER/CETIIS ou bien dans le cadre du programme européen MFSTEP (Mediterranean ocean Forecasting System Toward Environmental Predictions). Cependant ces modélisations restent encore à trop grande échelle pour appréhender les aspects sédimentaires. Concernant justement ces aspects sédimentaires, les modèles nécessaires ont été développés mais leur calibration actuellement en cours ne peut se faire que sur des régions instrumentées (Baie de Banyuls, embouchure de la Têt) ce qui est assez paradoxal si l'on considère que c'est bien le Rhône qui est le moteur du transport sédimentaire (pour les particules fines) pour tout le Golfe du Lion et probablement au-delà sur toute la région Catalane.

5 METHODOLOGIE

La méthodologie proposée pour ce programme se fonde sur une étude courantologique démarrée à l'automne 2006 avec l'ensemble des partenaires du projet CARMA ainsi que sur la mise en place d'un suivi morphologique de secteurs d'études préférentiels larges de quelques centaines de mètres. Ces « boîtes » doivent mettre en évidence la complexité de la zone étudiée. Les points forts de ce projet sont d'une part, la mise en œuvre d'une instrumentation performante (courantomètres Doppler, altimètres acoustiques) dans le débouché du Rhône, ce qui constitue une première, d'autre part le développement de la modélisation associée.

5.1 STRATEGIE

Pour atteindre ces différents objectifs, plusieurs méthodes de suivi des stocks sédimentaires seront employées : cartographie comparée des fonds bathymétriques, enregistrement in situ des taux de sédimentation (altimètres, voir chapitre 7.2), des paramètres hydrauliques (courantologie et houle), des flux sédimentaires (piégeage et ADCP), des paramètres physiques (sondes de turbidité, température, salinité).

Il est également important de réaliser que cette base d'instrumentation constituera un point d'ancrage pour d'autres études, en particulier dans le domaine de la biologie, dans la mesure où les apports du Rhône en matériel dissous et particulaire jouent un rôle majeur sur la richesse du Golfe du Lion comparé au reste de la Méditerranée.

Des marqueurs comme les radionucléides naturels (^{210}Pb , ^7Be ...) et artificiels (^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$,...) seront utilisés pour tracer les apports continentaux dans cette zone. Classiquement utilisés pour quantifier les processus de sédimentation, ils seront également utilisés au niveau de ce projet, pour étudier les phénomènes de translocation des sédiments apportés par le Rhône dans le Golfe du Lion.

5.2 ORGANISATION DES TACHES

5.2.1 Typologie des crues et des tempêtes

Afin de caractériser les événements extrêmes et les variabilités associées, on réalisera des simulations à partir des événements intervenus depuis 2004. Parmi ces derniers, on distingue deux catégories, les crues, les tempêtes sèches et les tempêtes dites humides conjuguant crues et houles.

5.2.2 Acquisition de données

5.2.2.1 Caractérisation du terme source

Les flux liquides du Rhône à la mer sont obtenus par l'enregistrement en continu (une mesure toutes les 5 minutes) des hauteurs d'eau du Rhône au niveau de la station Observatoire de l'IRSN située en Arles. Ces hauteurs d'eau sont converties en débits sur la section mouillée.

Les flux solides du Rhône à la mer sont quantifiés et qualifiés à partir des prélèvements réalisés au niveau de la station Observatoire (Masson et al, 2004). Les échantillons de matières en suspension sont composés selon un mode séquentiel temps. L'analyse des textures (granulométrie) est réalisée à partir des

échantillons collectés dans le piège à particules immergé au niveau de la tête de prélèvement de la station.

L'ensemble des échantillons est analysé par spectrométrie gamma afin de quantifier les flux d'un certain nombre de radioéléments caractérisant les apports du Rhône à la Méditerranée.

5.2.2.2 Relevés topo bathymétriques

Deux campagnes de profils topo bathymétriques ont été réalisées du 20 janvier 2006 au 14 février 2006 à partir des moyens usuels de topographie et de bathymétrie : tachéomètre Leica, DGPS Trimble 4500, écho sondeur Tritech 500 embarqué sur une embarcation légère. Les profils sont géo référencés en Lambert III sud et traités par SIG et sous logiciel d'analyse de profils BMAP. Ils permettront de caractériser l'évolution de la morphologie littorale (côte et fond) en réponse aux événements intenses sous la forme de modification du trait de côte ou des structures sous-marines comme les chenaux qui sont des voies de transfert des sédiments vers le large.

5.2.2.3 Mouillages à long terme

L'instrumentation du proche débouché du Rhône permettra de quantifier les quantités de sédiment repris durant les épisodes de crues et de tempêtes. Ces données seront acquises grâce à 2 ADCP (profileurs de courant Doppler, cf. chapitre 7.1) positionnés à l'Est de l'embouchure du Rhône en deux points (40 m et 20 m ; Fig. 4) et à 6 altimètres, 4 au niveau de la proche embouchure notamment 2 positionnés sur le haut de la zone prodeltaïque dans les structures en chenaux mises en évidence en 2002 et 2 en le Rhône à hauteur du domaine de La Palissade (Fig.5). Une intervention sur alerte sera possible pour prélever des échantillons de sédiment nous permettant de caractériser à partir de la radioactivité naturelle et artificielle les taux de sédimentation, mais également la granulométrie du sédiment.

Stations de mise à l'eau des ADCP et des altimètres à l'embouchure du Rhône

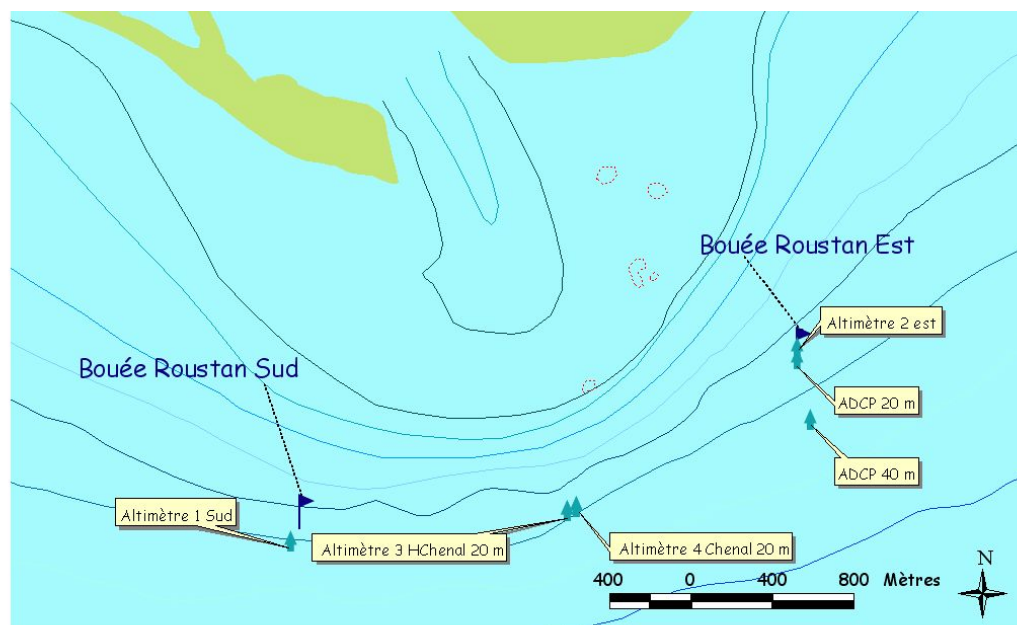


Fig. 4 : Position des stations instrumentées à l'embouchure du Rhône.

Cette phase expérimentale a démarré en octobre 2006 et devrait s'achever courant mai 2007. Cette période automne-hiver et début de printemps est en effet la saison la plus propice aux crues et aux tempêtes.

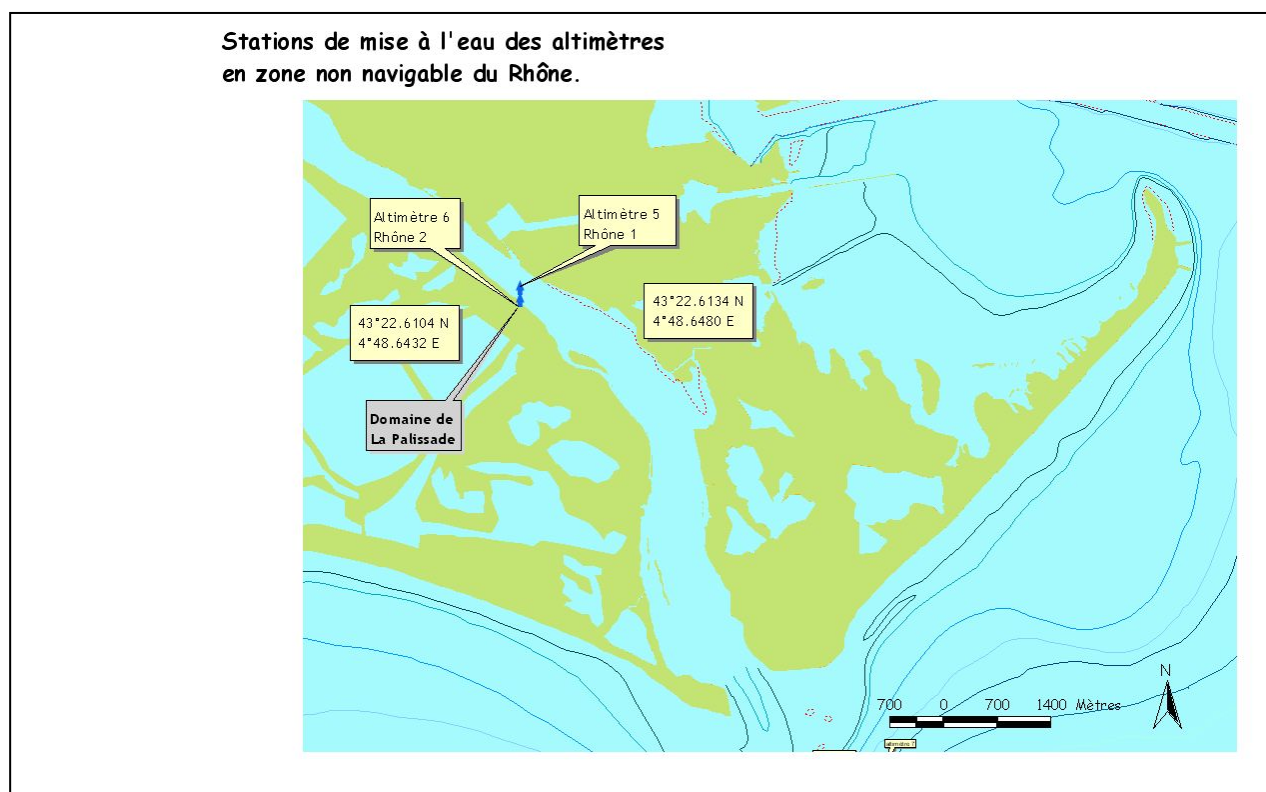


Fig. 5 : Positionnement des stations instrumentées dans le Rhône.

5.2.2.4 Prélèvements de sédiments en mer

Des carottages seront effectués dans la zone prodeltaïque afin de compléter les séries temporelles de divers radioéléments obtenues dans cette région depuis 1990. Des prélèvements seront réalisés lors d'une campagne CARMEX de 7 jours en mars 2007 à bord du NO Europe. Des marqueurs comme les radionucléides naturels (^{210}Pb , ^7Be ...) et artificiels (^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$,...) seront utilisés pour tracer les apports continentaux dans cette zone et étudier les phénomènes de translocation des sédiments apportés par le Rhône dans le Golfe du Lion.

5.2.3 Modélisation de l'érosion des dunes de la flèche de la Gracieuse

Le modèle utilisé (Sbeach, licence au CEREGE) est un modèle 2DV qui simule le recul du rivage et l'érosion des dunes durant les tempêtes. Ce modèle a été testé, calibré et validé pour les plages de

Camargue dans le cadre d'un projet soutenu par le programme national Liteau. Le présent projet pourra donc bénéficier de l'expérience acquise précédemment sur ce modèle.

5.2.4 Estimation des apports sableux du Rhône aux plages limitrophes

L'estimation des apports sableux du Rhône aux plages limitrophes sera réalisée au moyen d'un modèle 2DV qui calcule le transit littoral en prenant en compte l'influence des débits du fleuve sur la propagation de la houle et du déferlement (modèle NMLONG, licence au CEREGE). Les résultats obtenus ne seront que des ordres de grandeurs, ils permettront surtout de distinguer si la fourniture des sables aux plages par le transit littoral s'effectue durant les crues ou pendant les périodes d'accalmies.

5.2.5 Modélisation du transport des sédiments fins : influence des crues et des tempêtes

Le modèle 3D - SYMPHONIE sera couplé à un modèle de transport sédimentaire et un modèle de génération et de propagation de la houle pour étudier les différentes phases du transport de la matière particulaire apportée par le Rhône. Son utilisation pour des simulations correspondant aux phases d'acquisition des données in-situ permettra sa calibration et sa validation.

Plus précisément, il s'agit de calibrer le modèle afin de restituer la dynamique temporelle observée (en quelques points) de la zone prodeltaïque (qui constitue la principale zone d'accumulation) et surtout la succession des périodes de dépôt et d'érosion sous l'effet des crues et des tempêtes. Le modèle ainsi calibré sera utilisé pour spatialiser cette information ponctuelle et estimer ainsi les volumes de sédiment mis en jeu par ces événements. Ceci permettra de mettre en évidence à plus grande échelle la translocation des sédiments apportés par le Rhône et remis en suspension sur la zone prodeltaïque, de caractériser la fraction redéposée et en particulier le dépôt dans les zones littorales et sur l'ensemble du plateau continental puis finalement l'exportation vers le large.

6 LES PARTENAIRES ET LEURS RÔLES

6.1 Les partenaires scientifiques :

6.1.1 POC (Midi-Pyrénées)

Le POC (Pôle d'Océanographie Côtière de l'Observatoire Midi-Pyrénées) s'intéresse plus particulièrement à la modélisation du devenir des apports des rivières, leurs voies de passage sur le plateau continental et le rôle des canyons sous-marins dans leur exportation vers le large. Des modules numériques sont développés à cet effet et un modèle de génération et propagation de houle est mis en œuvre grâce à une collaboration avec le SHOM. D'une expérience précédente au travers du programme européen Eurostrataform, le POC a acquis des connaissances sur la modélisation du transport sédimentaire dans le Golfe du Lion, ceci a abouti à une thèse soutenue en 2005 (Caroline Ulses) sur la « dynamique océanique et transport de la matière particulaire dans le Golfe du Lion : crue, tempête et période hivernale ».

Dans ce projet le POC est chargé en particulier de la calibration du modèle de transport sédimentaire en utilisant les données in-situ : courants, turbidité, taux d'érosion / dépôt.

6.1.2 CEREGE (PACA)

Les travaux de l'équipe de Géomorphologie du CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement) portent sur les flux sédimentaires deltaïques tant au niveau fluvial

que littoral. L'évolution historique et récente des flux solides au niveau de l'embouchure a été quantifiée lors d'une thèse (G. Maillet, 2005) sur les « Relations sédimentaires récentes et actuelles entre un fleuve et son delta en milieu microtidal : exemple du Rhône ». Les travaux réalisés dans ce programme et au travers d'une nouvelle thèse cofinancée par la Région PACA se fixent pour objectifs principaux le suivi des stocks sableux actuels et fossiles dans la zone de l'embouchure du Grand Rhône et la redistribution naturelle ou artificielle de ces stocks.

Dans le cadre du projet, le CEREGE se charge des relevés topo-bathymétriques réalisés pour cartographier la proche zone d'embouchure et les plages, de la modélisation 2DV des apports sableux du Rhône aux plages et de la modélisation de l'érosion de la dune de la flèche de la Gracieuse.

6.1.3 IRSN/LERCM (PACA)

Dans le cadre du projet, le LERCM est en charge de la caractérisation du terme source et participe en collaboration avec le CEREGE et les partenaires industriels PACA au suivi des apports sédimentaires et de leur devenir tout particulièrement pendant les épisodes extrêmes (c'est-à-dire crues et tempêtes). Le LERCM étudie également la caractérisation des radioéléments portés par ces particules (radionucléides naturels (^{210}Pb , ^7Be ...) et artificiels (^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$,...) qui seront utilisés pour tracer les apports continentaux dans la zone étudiée. Il réalise une cartographie de la granulométrie des sédiments de l'ensemble du Golfe du Lion nécessaire à la modélisation en collaboration avec différents organismes (IFREMER, CEREGE, Station Marine de Banyuls..).

Une thèse IRSN débutée en octobre 2005 sur le thème « Dynamique et bilan des transferts particuliers de radioéléments d'origine anthropique et naturelle dans le Golfe du Lion : cas particulier des apports rhodaniens » utilise les données collectées au cours de ce projet.

6.2 Les partenaires industriels :

6.2.1 NOVELTIS (Midi-Pyrénées)

NOVELTIS est une société d'assistance pour la réalisation de projets scientifiques portant sur l'environnement. Son implication dans le projet CARMA consiste, d'une part à apporter son expertise et son savoir-faire dans la création et la réalisation de nouveaux systèmes opérationnels d'analyse et d'autre part à favoriser le transfert, la consolidation et la valorisation de travaux de recherche en sciences spatiales et de l'environnement grâce à la mise en place de collaborations avec les laboratoires français et européens (CNRS, INSU, IPSL, OMP, IEEC, Imperial College of Science...).

Dans le cadre de ce projet, Noveltis prend en charge : la réalisation des simulations nécessaires à la typologie des effets des crues et des tempêtes (années 2002-2004) comprenant deux périodes de crues intenses et une dizaine de tempêtes, les simulations de génération et propagation des vagues, la gestion des simulations dynamiques (circulation et apports du Rhône) pendant la période de suivi et la réalisation du site web à partir des contributions fournies par chacun des partenaires.

6.2.2 IN VIVO ENVIRONNEMENT (PACA)

Ce bureau d'études en océanographie côtière est en charge de la mise à l'eau et du suivi mensuel des deux ADCP durant toute la période d'observations, de la fourniture bimestrielle des données brutes acquises et de la récupération des appareils en fin de période d'observations.

6.2.3 ADHOC VISION (PACA)

Cette société spécialisée dans le développement d'équipements d'observations spécifiques au milieu marin, robotiques notamment s'occupe du mouillage et de l'installation de 6 altimètres dans la zone d'étude, du suivi sur site du bon fonctionnement pendant la durée de la campagne (6 mois), du recueil des données et de la récupération du matériel en fin de campagne.

7 MATERIEL ACQUIS DANS LE CADRE DU PROJET

L'IRSN a acquis un ADCP, 6 altimètres acoustiques et 2 sondes multi paramètres. Le deuxième ADCP a été acquis par nos partenaires de la Région Midi-Pyrénées. Une cage anti-chalut pour l'ADCP implanté à 40 m a été fabriquée par In-Vivo Environnement et acquise par l'IRSN.

7.1 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Pour effectuer le suivi en continu des courants et pouvoir mesurer la houle deux courantomètres à effet Doppler avec module de houle sont mis en œuvre.

Ce dispositif (Fig.6) émet un signal acoustique qui est successivement réverbéré sur différentes couches d'eau contenant des micro-organismes (plancton...) et autres particules en suspension. La vitesse et la direction du courant dans plusieurs tranches d'eau sont déterminées par la mesure du délai entre l'émission et la réception du signal, le déplacement des particules en suspension étant supposé rendre compte du courant qui les met en mouvement. L'orientation du courant par rapport au nord magnétique est effectuée à l'aide d'un compas magnétique interne et celle des axes d'émission du signal est assurée par deux inclinomètres. Un capteur d'immersion (pressiomètre) permet de recalibrer les mesures en profondeur. Le profileur dispose d'une résolution de 1 mètre ; immergé à 40 mètres, il enregistre 40 cellules de mesure sur la hauteur d'eau. La fréquence d'enregistrement des données de courant est de 18 secondes toutes les 15 minutes, pour les données de houle, l'enregistrement se fait pendant 10 minutes toutes les 3 heures. Après récupération du profileur, les données enregistrées sont transférées sur un ordinateur puis traitées.

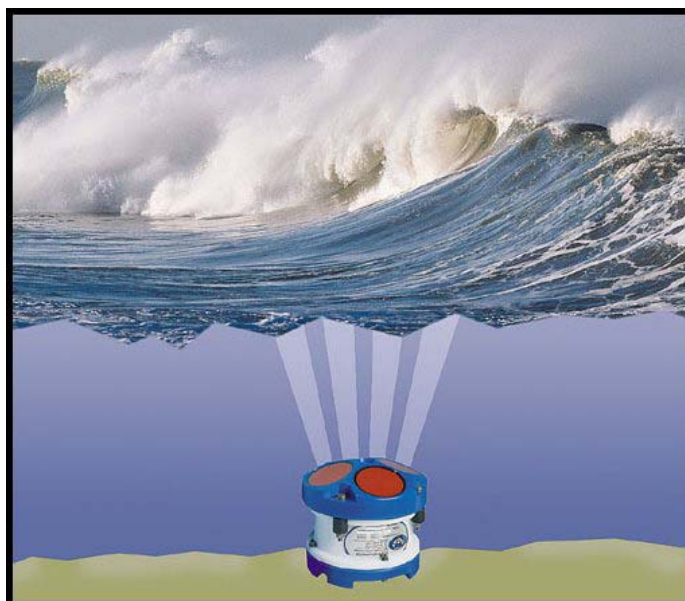


Fig. 6 : ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) muni d'un module de houle.

Ces instruments sont immergés en deux points à l'embouchure du Rhône à environ 20 m et 40 m de profondeur. Les coordonnées de ces points d'implantation ont été définies par rapport aux données de sédimentologie acquises antérieurement par les équipes dans cette zone et aux risques liés à la durée d'immersion. En effet l'embouchure du Rhône est une zone de pêche intensive et notamment de pêche au chalut. L'ADCP implanté à 20 m de profondeur est situé à proximité de la bouée Roustan Est. Il sera donc relativement protégé par l'existence de cette bouée dans la mesure où les pêcheurs ne passent théoriquement pas à moins de 20 m de part et d'autre de la bouée. En revanche, l'ADCP situé à 40 m de profondeur sera muni d'une cage anti-chalut. Les autorités maritimes et les prudhommes de pêche sont prévenus de l'instrumentation de cette zone et ils ont connaissance des coordonnées des stations de mouillage prévues dans le cadre de ce projet.

L'ADCP acquis par l'IRSN est muni d'un pack batterie supplémentaire, d'une extension mémoire de 1 Go, d'un capteur de pression et d'une extension spectre directionnel de houle.

7.2 ALTIMETRES

Les appareils utilisés sont des altimètres à ultrasons (système ALTUS/NKE). Ils ont été conçus pour mesurer des différences de niveaux sédimentaires en réponse à un événement climatique (houle, tempête, crue...), afin de quantifier les quantités de sédiment déposés et repris durant les épisodes de crues et de tempêtes...

Fonctionnant sur le principe d'un écho sondeur, avec une fréquence d'émission des ultrasons de 2 MHz, le dispositif comprend un module destiné à être enfoui dans le sédiment et un transducteur monté sur un support trépieds (Fig. 7). C'est un appareil autonome qui enregistre des grandeurs physiques : la distance du transducteur à la cible (Altitude), le niveau maximum du signal reçu par le transducteur (Echo max.) et la profondeur. L'appareil est posé sur des fonds variant entre 5 et 30 m et peut fonctionner en continu sur une période de 6 mois. Les données peuvent être déchargées régulièrement en plongée à l'aide d'un data pencil étanche muni d'un câble de transmission de données de 80 m. La fréquence d'enregistrement est d'une mesure toutes les 15 minutes.



Fig. 7 : L'altimètre « ALTUS ».

Ces appareils sont implantés en quatre stations à l'embouchure du Rhône, deux à proximité des deux bouées de signalisation sud et est et deux dans les chenaux précédemment repérés lors du programme Eurostrataform (Fig. 4). Un largeur petit fond a été associé à chaque altimètre implanté en mer afin de faciliter leur repérage et leur récupération. Deux altimètres ont été positionnés dans le Rhône à proximité du Domaine de la Palissade.

7.3 SONDES MULTIPARAMETRES

La seule manière directe d'acquérir les données de courants est d'immerger des enregistreurs adaptés à chaque paramètre. Notre dispositif expérimental est basé sur le suivi en continu sur une période donnée de paramètres clés (température, pression, turbidité, salinité). A l'heure actuelle aucune sonde ne permet à la fois de mesurer la turbidité et la salinité avec la précision requise. Pour réaliser ce suivi en continu des différents paramètres, 2 types d'enregistreurs ont été acquis. Ils sont munis de systèmes évitant l'encrassement des cellules de mesures dans le temps.

Un premier enregistreur TPS 100/NKE (Fig.8) mesure la température et la conductivité, pour calculer la salinité. Son interface de transmission de données permet de dialoguer avec un PC à l'aide d'un data pencil étanche directement en immersion. L'appareil est fourni avec une protection en caoutchouc vulcanisé contre les chocs.

Un deuxième enregistreur STBD 100/NKE (Fig.8) mesure la température, la pression (ce qui permettra de caler les données) et la turbidité. Ce dernier paramètre sera mesuré dans une gamme de 0 à 750 NTU (3 g.l^{-1}). Il est équipé d'un capteur Seapoint émettant une lumière modulée à 880 nm. La lumière réfléchiée par les particules est détectée par une cellule fournissant un signal proportionnel à leur concentration dans le milieu.

Ces enregistreurs autonomes sont équipés chacun avec un chlorateur et une grille de chloration évitant le biofouling. Il s'agit d'un système de courant passant entre une anode et une cathode.

Le logiciel de traitement des données est le même que celui des altimètres.

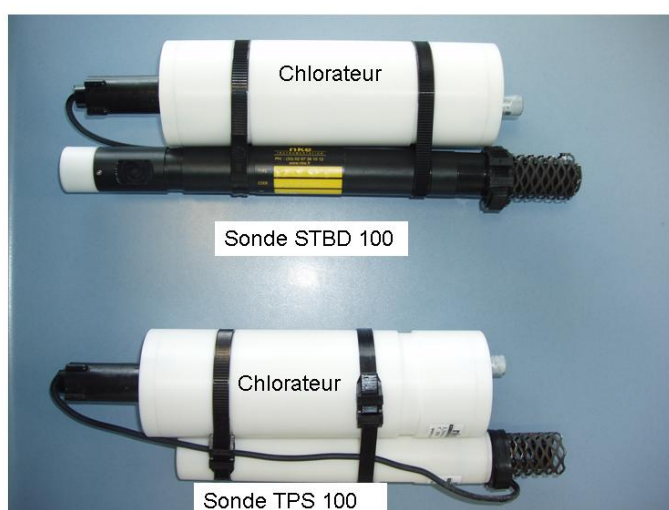


Fig. 8 : Représentation des 2 sondes multiparamétriques.

Ces instruments dans un premier temps destinés à être immergés en un point de l'embouchure du Rhône à environ 40 m de profondeur et placés dans l'environnement de l'ADCP pour en compléter les mesures sont utilisés pour effectuer des profils à chaque intervention sur le terrain. En effet, les sondes devaient dans un premier temps être placées dans la première cellule de mesure de l'ADCP de 40 m (entre 0 et 1 m au dessus de la cage) mais le fort chalutage existant dans cette zone, a conduit à ne pas rajouter une ligne de mouillage sur la cage anti-chalut dans laquelle est placé l'ADCP de 40 m.

Lorsque des profils ponctuels sont réalisés les sondes sont paramétrées pour réaliser une mesure toutes les secondes.

7.4 ASSURANCES

Une police d'assurance a été prise par l'IRSN afin de garantir l'ensemble du matériel nécessaire à l'instrumentation du Rhône et de son embouchure pour une durée de six mois. Il s'agit d'une garantie pertes et dommages survenus aux biens assurés. Les risques couverts sont les dommages et pertes subis durant les transports maritimes, les vols et tentatives de vol, la disparition du matériel au fond, le bris pour causes externes. D'une façon générale, sont couverts les dommages et pertes conséquence d'événement et/ou fortune de mer, ou par toutes autres causes extérieures.

8 INSTRUMENTATION DE L'EMBOUCHURE DU RHÔNE

Le 2 mars 2006 les partenaires se sont retrouvés à Sète pour une réunion de lancement du programme, mais des campagnes de terrain ont eu lieu dès janvier 2006.

8.1 Essais

Les différents appareillages ayant été réceptionnés d'août à novembre 2006, les premiers essais ont démarré courant septembre.

Plusieurs essais d'implantation en mer ont été nécessaires pour les altimètres avant une mise à l'eau pour une période de 6 mois. En effet, la structure tubulaire en acier inox d'origine s'est avérée trop fragile et trop courte pour la zone d'étude concernée où le taux de sédimentation est élevé de l'ordre de 30 à 40 cm par an avec un sédiment de surface très meuble et une possibilité d'envasement relativement élevé (environ 40 cm, estimation relevée en plongée). La structure initiale a donc été montée sur des ancrs à vis de 1,20 m (Fig.9). Ces ancrs à vis sont enfoncées dans le sédiment en plongée, la structure inox y est ensuite fixée par des plongeurs.

L'implantation dans le Rhône est soumise à un paramètre supplémentaire : le débit du Rhône qui rend l'intervention en plongée, et notamment la stabilisation au fond, délicate. Une structure différente a donc été conçue avec des fers à béton (annexe 7). L'altimètre est solidaire de sa structure et implanté directement dans le sédiment.

En ce qui concerne les ADCP, le paramétrage a été simulé dans un premier temps dans le Rhône. Un essai a été réalisé dans le bassin d'essais du Centre Ifremer de Méditerranée pour tester à la fois la mise en place et le relevage de la cage anti-chalut ainsi que le déploiement de l'ADCP.

Les deux sondes réceptionnées fin novembre 2006 sont encore en test lors des campagnes de relevage des données.

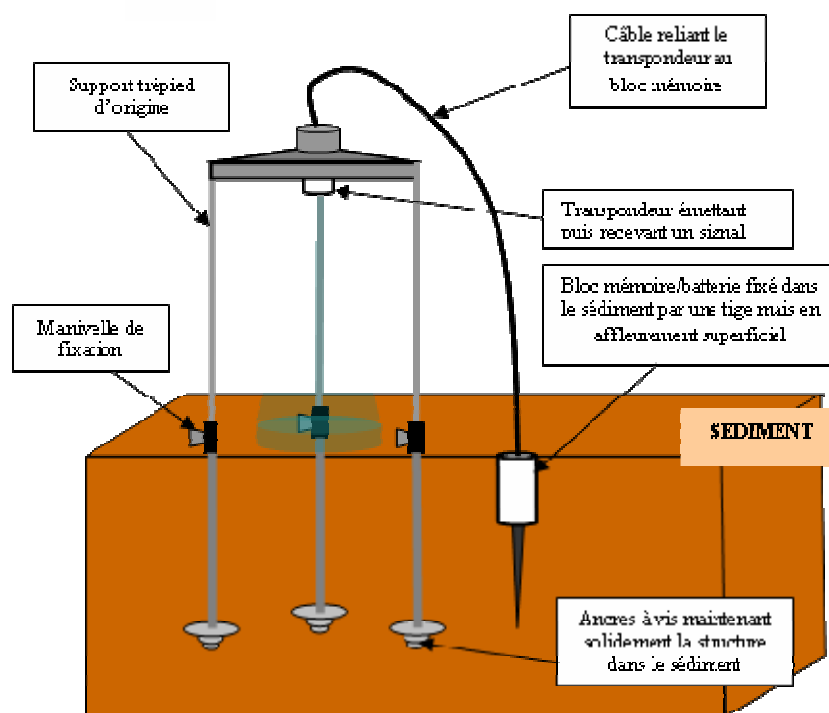


Fig. 9 : Schéma d'implantation des altimètres dans le milieu marin

8.2 Mises à l'eau

La mise à l'eau des différents appareils est soumise à de nombreux aléas qui sont à la fois dus à la météo, au débit du Rhône, à la disponibilité des plongeurs, à l'obtention et la mise à disposition d'une barge nécessaire à la manipulation de structure telle que la cage anti-chalut.

Chaque intervention sur le terrain nécessite 2 ou 3 bateaux parmi : les deux zodiacs du LERCM, le bateau à coque rigide du CEREGE et la barge louée à un mytiliculteur de Martigues. L'intervention se fait soit au départ de Port Saint-Louis du Rhône, soit de Martigues. Outre la météo, l'un des facteurs limitant l'intervention en mer est le passage de la barre d'embouchure.

La première campagne de mise à l'eau a débuté fin octobre 2006. Six campagnes ont été nécessaires pour que tous les appareils soient en place fin novembre 2006 (annexe 4). Les mouillages des ADCP sont différents pour les deux stations de 20 et 40 m (annexe 5).

Dans le futur, la réparation du bateau de station du Centre Océanologique de Marseille (COM), l'ANTEDON devrait permettre plus de souplesse en ce qui concerne la planification des interventions.

9 PREMIERS RESULTATS

9.1 Inventaire des épisodes de crue du Rhône

Le financement accordé ayant été restreint, l'inventaire et la caractérisation des événements extrêmes, se limitera à quelques études existantes sur des épisodes de crues et de tempêtes sans classement par catégorie ni analyse statistique.



Fig. 10 : Débit du Rhône ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) sur la période 2002-2006 (données de la CNR).

Trois crues exceptionnelles ont marqué la période 2002-2006 (Fig.10) :

- en septembre 2002, elle a atteint des débits maxima de $6800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (le débit moyen du Rhône se situe autour de $1700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) ; et peut être qualifiée de crue océanique puisqu'elle a concerné essentiellement les affluents supérieurs du fleuve.
- le mois suivant en novembre 2002, elle a atteint $10110 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; et a concerné l'ensemble des affluents du fleuve. Elle a duré 26 jours.
- et une en décembre 2003, relativement courte (5 jours) avec des débits exceptionnels de $11650 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; elle est due à un accroissement des précipitations sur les parties méridionales du bassin versant du fleuve (valeurs récoltées par la Compagnie Nationale du Rhône à Beaucaire).

L'année 2004 a été marquée par une crue automnale d'une dizaine de jours durant laquelle le Rhône a atteint un débit maximal de $4406 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Les années 2005 et 2006 apparaissent comme des années 'calmes' avec chaque fois une crue printanière ayant atteint seulement des débits de $3500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

9.2 Flux de matières en suspension et de polluants radioactifs lors des crues

Le suivi des apports du fleuve, en matières en suspension et en radioéléments, à la Méditerranée est effectué à la station IRSN située en Arles, les résultats obtenus sur la période 2002-2005 sont reportés dans le tableau ci-après.

Au niveau des flux de matière et de radioéléments les crues se révèlent être le vecteur principal. Ainsi, en 2002 et 2003, années caractérisées par des crues importantes, plus de 80% du flux annuel de matériel particulaire et plus de 70% des apports en radioéléments d'origine artificielle sont intervenus lors des épisodes de crues. En 2004-2005, années relativement calmes au niveau des crues du fleuve, ces chiffres sont inférieurs respectivement à 60% et 45% et les valeurs de flux sont de plus en plus faibles.

Années	Paramètres évalués	Export particulaire (t)	Radioéléments artificiels (GBq)		Radioéléments naturels (GBq)	
			¹³⁷ Cs	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	⁷ Be	²¹⁰ Pbxs
2002	Flux annuel total	10,9 10 ⁶	194 ± 58	3,2 ± 1,0	547 ± 164	349 ± 104
	Flux annuel en crue uniquement	9,6 10 ⁶	140 ± 42	2,3 ± 0,7	313 ± 94	215 ± 65
	Ratio	88%	72%	73%	57%	62%
2003	Flux annuel total	8,3 10 ⁶	158 ± 47	2,5 ± 0,8	366 ± 110	261 ± 78
	Flux annuel en crue uniquement	6,9 10 ⁶	113 ± 34	1,9 ± 0,6	173 ± 52	154 ± 46
	Ratio	83%	71%	73%	47%	59%
2004	Flux annuel total	3,7 10 ⁶	67 ± 20	1,1 ± 0,3	258 ± 77	149 ± 45
	Flux annuel en crue uniquement	2,2 10 ⁶	29 ± 9	0,4 ± 0,1	90 ± 27	57 ± 17
	Ratio	59%	43%	42%	35%	38%
2005	Flux annuel total	0,98 10 ⁶	23 ± 2,5	-	66,7 ± 11,4	-
	Flux annuel en crue uniquement	0,33 10 ⁶	4,4 ± 0,5	-	13,2 ± 2,0	-
	Ratio	36%	19%		20%	

Tableau 1 : Flux de matières en suspension et de radioéléments (dissous+particulaires) vers la mer Méditerranée sur la période 2002 à 2005.

9.3 Acquisition de profils bathymétriques et topographiques

Le suivi des conséquences des crues et des tempêtes par levées topographiques et bathymétriques consiste à faire un état des lieux des derniers kilomètres du Rhône, de l'embouchure et de la Flèche de la Gracieuse afin d'effectuer par la suite un suivi des impacts des événements sur la morphologie du système (Fig. 11).

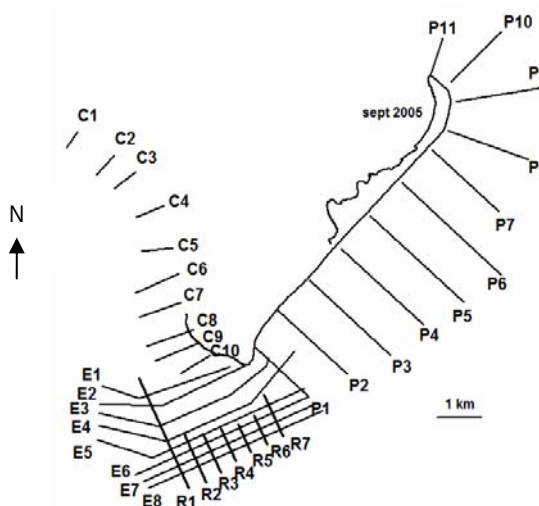


Fig. 11 : Localisation des profils bathymétriques dans le Rhône, à l'embouchure et le long de la Flèche de la Gracieuse

Deux campagnes de profils topographiques relevés au théodolite ont été effectuées au niveau de la Flèche de la Gracieuse (10 janvier 2006 et 14 février 2006) afin de cadrer une forte tempête de vent d'est (27 et 28 janvier 2006, 35 à 40 nœuds). Trois campagnes de mesure de profils bathymétriques entre -1,5 et -20 m environ ont été réalisées le long de la Flèche de la Gracieuse, les deux premières étant séparées par une tempête de vent d'est (27 et 28 janvier 2006). Début février, l'ensemble du secteur (Rhône, embouchure, Flèche de la Gracieuse) a été sondé.

Les premiers résultats montrent une variabilité spatiale et temporelle des profils transversaux des derniers kilomètres du Rhône (Fig.12). A l'embouchure, les sédiments semblent se diriger préférentiellement vers l'est et l'ouest du chenal. Sur le promontoire de la barre, le chenal est en érosion de même qu'au large de la barre d'embouchure.

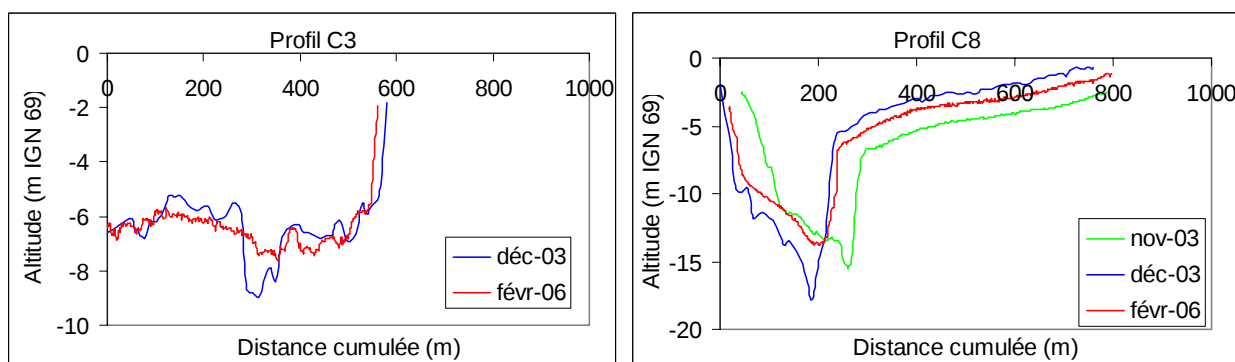


Fig. 12 : Evolution des profils transversaux du Rhône (profils C3 et C8) entre novembre 2003 et février 2006

Le long de la Flèche de la Gracieuse, les profils bathymétriques présentent une relative stabilité temporelle, excepté un profil (P1), proche de l'embouchure, en accumulation (Fig.13). Au niveau morphologique, les profils sont très divers le long de la flèche, témoignant des dynamiques marines et des bilans sédimentaires différents depuis l'embouchure vers l'extrémité de la flèche. La plage émergée ainsi que la zone immergée jusqu'à 5 m environ évoluent selon les conditions météorologiques, qu'il conviendra de définir par une analyse des forçages (houle, vent, marée). Une étude approfondie de cette zone est à privilégier à l'avenir afin de comprendre le transit sédimentaire le long de la Flèche de la Gracieuse. Il reste à caractériser la granulométrie des sables le long de la Flèche de la Gracieuse pour confirmer les mobilités sédimentaires observées.

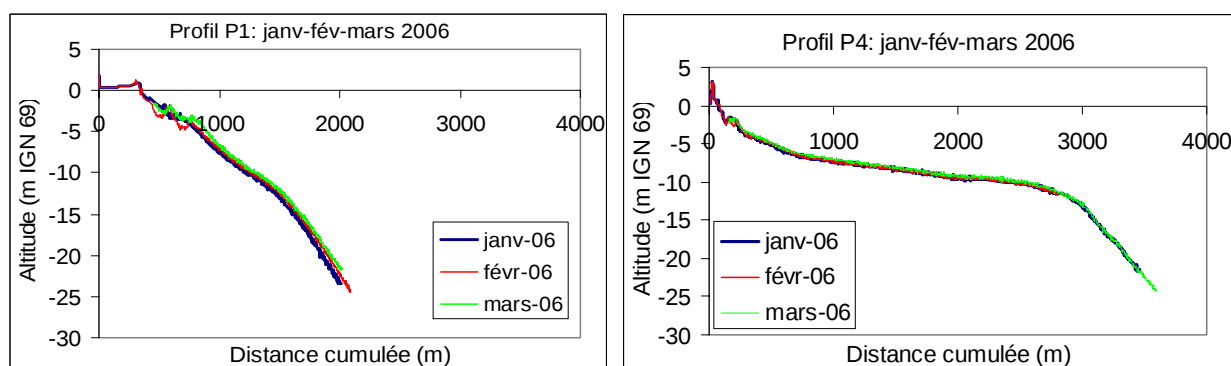


Fig. 13 : Evolution des profils P1 et P4 entre janvier et mars 2006

9.4 Simulation des événements exceptionnels de l'hiver 2003-2004

La période octobre 2003 - avril 2004 a été modélisée avec le modèle hydrodynamique Symphonie. La simulation a été validée à partir d'enregistrements de courant et de température réalisés sur le plateau au sud-ouest du Golfe du Lion et dans les têtes des principaux canyons à des profondeurs de 300 m (Ulses, 2005). Le modèle a ensuite été couplé avec le transport sédimentaire et de même, une validation raisonnable a pu être obtenue vis-à-vis des mesures de turbidité localisées aux mêmes points que les mesures hydrologiques et courantométriques.

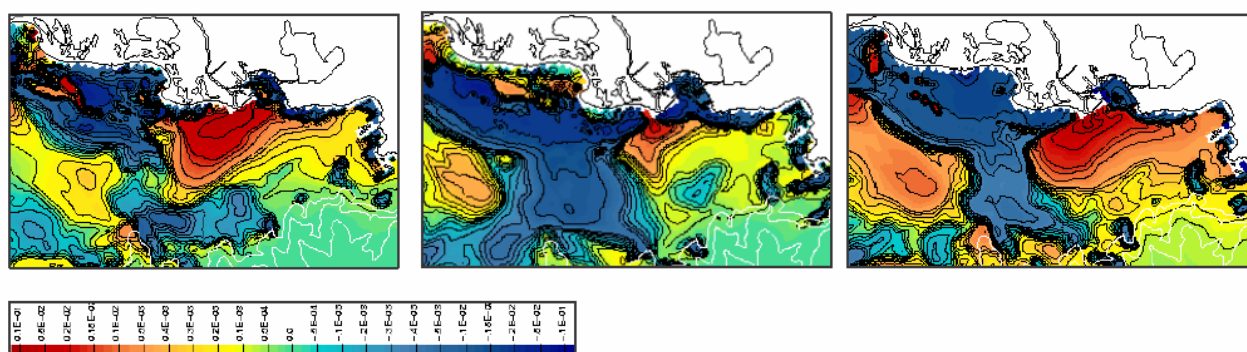


Fig.14 : Chronologie du dépôt et de l'érosion sédimentaire au cours de l'hiver 2003-2004.

Les valeurs positives (de jaune à rouge) correspondent à du dépôt tandis que les valeurs négatives (bleu clair à bleu foncé) marquent les zones d'érosion :

- La figure de gauche correspond à la mi-décembre soit quelques jours après la crue du Rhône accompagnée de vent puissant et houle forte. La figure centrale correspond à la fin février, quelques jours après la tempête du large (vent et houle) sans crue du Rhône tandis que la figure de droite correspond à la fin de la période simulée (fin avril) alors que plusieurs tempêtes plus mineures se sont succédées de mars à avril. On constate d'après la première figure que la matière apportée par le Rhône s'est fortement accumulée devant l'embouchure (en rouge) marquant ainsi le dépôt prodeltaïque. Au contraire, les zones plus à l'ouest et également le bord du plateau au sud-sud-ouest de l'embouchure ont été érodées. Cette érosion a pour principale origine la houle pour la zone côtière Camarguaise tandis que plus au large, ce sont les courants forts qui érodent le sédiment.

- La figure centrale montre comment la très énergétique tempête de février vient remanier le prodelta. Une partie importante du dépôt de la crue de décembre a été remise en suspension par l'action conjuguée de la houle et du courant. Par ailleurs, les zones d'érosion s'étendent également. A la suite des tempêtes, des quantités importantes de matière sont mises en suspension dans la colonne d'eau. Suivant la taille des particules, celles-ci peuvent être déplacées sur des distances plus ou moins importantes avant de se déposer.

- La figure de droite nous informe sur la redistribution des sédiments à la fin de la période des tempêtes. On peut voir que le prodelta s'est reconstitué et plus généralement le dépôt s'est développé aux mêmes endroits qu'en début de période (à l'est du Rhône ainsi que dans la partie ouest entre 50 et 80 m de fond). Ces résultats sont qualitativement corroborés par la carte sédimentaire établie par Monaco et Aloisi. Le point troublant qu'il faut élucider est l'extension vers le sud de la zone d'érosion Camarguaise qui interrompt la zone de dépôt au sud du Golfe des Saintes-Maries.

10 - RESULTATS ET ACTIONS A VENIR

Les premières données des altimètres et des ADCP seront relevées dans le courant des mois de janvier-février 2007. Une campagne en mer a été acceptée par le CIRMED et programmée du 11 au 17 mars 2007 sur le NO Europe.

Lors de cette campagne les paramètres clés (apports du fleuve, courants, turbidité, niveau sédimentaire) seront suivis en temps réel et les données de l'instrumentation déployée à l'embouchure du Rhône seront relevées.

Des carottages seront effectués afin de tracer les apports continentaux dans cette zone en utilisant des marqueurs comme les radionucléides naturels (^{210}Pb , ^7Be ,...) et artificiels (^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$,...). Classiquement utilisés pour quantifier les processus de sédimentation, ils seront également utilisés, au niveau de ce projet, pour étudier les phénomènes de translocation des sédiments apportés par le Rhône dans le Golfe du Lion. Les carottages seront effectués dans la zone prodeltaïque du Grand-Rhône et du Petit Rhône afin de compléter les séries temporelles de divers radioéléments, obtenues dans cette région depuis 1990. Les mesures obtenues lors de cette campagne comme celles obtenues lors la période d'instrumentation permettront de calibrer et valider la modélisation numérique qui pourra être utilisée de manière prospective et par exemple être intégrée dans un second temps dans une approche de gestion du littoral.

11 Liste des documents supports

Antonelli C., 2004 : Rapport intermédiaire de Post-Doctorat : Représentativité des flux de radioactivité mesurés par la station observatoire du Rhône (Station d'Arles - réseau OPERA), Rapport DEI/SESURE n° 2004-15

Antonelli C., Provansal M., Vella C., 2004 : Recent morphological channel changes in a deltaic environment. The case of the Rhône River, France. *Gemorphology*, 57, 345-402.

Auclair F., Marsaleix P., and De Mey P., 2003 : Space-time structure and dynamics of the forecast error in a coastal circulation model of the Gulf of Lions. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 36, 309-346.

Auclair F., Marsaleix P. and Estournel C., 2001 : The penetration of the northern current over the Gulf of Lion (western Mediterranean Sea) as a downscaling problem. *Oceanologica Acta*, 24, 529-544.

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, 359p.

Charmasson S., 2003 : ^{137}Cs inventory in sediment near the Rhone mouth : Evaluation of the role played by different ^{137}Cs sources in this area. *Oceanologica Acta*, 26, 4, 435-441.

Charmasson S., Radakovitch O., Arnaud M., Bouisset P., Pruchon A.-S., 1998 : Long-core profiles of ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co and ^{210}Pb in sediment near the Rhône mouth (Northwestern Mediterranean Sea). *Estuaries*, 21, 3, 367-378.

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.

Ulses C., Grenz C., Marsaleix P., Schaaff E., Estournel C., Meulé S. and Pinazo C., 2005 : Circulation in a semi-enclosed bay under influence of strong freshwater input. *Journal of Marine Systems*, Volume 56, Issues 1-2, May 2005, 113-132.

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, pages 7-1 to 7-18.

Estournel C., Broche P., Marsaleix P., Devenon J.L., Auclair F. and Vehil R., 2001 : The Rhone river plume in unsteady conditions : numerical and experimental results. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 53, 25-38.

Eyrolle F. et Charmasson S., 2001 : Distribution of organic carbon, selected stable elements and artificial radionuclides among dissolved, colloidal and particulate phases in the Rhône river (France) : preliminary results. *Journal of Environmental Radioactivity*, 55, 145-155.

Eyrolle F. et Charmasson S., 2004 : Importance of colloids in the transport within the dissolved phase (<450nm) of artificial radionuclides from the Rhone River towards the Gulf of Lions (Mediterranean Sea). *J. Environ. Radioact.*, 72 (3), 273-286.

Eyrolle F., Duffa C., Antonelli C., Rolland B. and Leprieur F., 2006 : Radiological consequences of the extreme flooding on the lower course of the Rhone valley (December 2003, South East France). *Science of The Total Environment*, Volume 366, Issues 2-3, 1 August 2006, 427-438.

Eyrolle F., Charmasson S., 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. *J. Environ. Radioact.*, 74, 127-138.

Lansard B., 2004 : Distribution et remobilisation du plutonium dans les sédiments du prodelta du Rhône (Méditerranée Nord-Occidentale). Thèse Univ. Aix-Marseille II, 180p.

Maillet G., Vella C., Berné S., Friend P., Amos C., Fleury T. and Normand A., 2006 : Morphological changes and sedimentary processes induced by the December 2003 flood event at the present mouth of the Grand Rhône River (southern France) *Marine Geology*, Volume 234, Issues 1-4, 18 December 2006, 159-177.

Maillet G., Rizzo E., Revil A. and Vella C., 2004 : High resolution Electrical Resistivity Tomography (ERT) in a transition zone environment. Application for detailed internal architecture and infilling processes study of a Rhône River paleo-channel. *Marine Geophysical Researches*, Missiaen T; Wardell N & Dix J. (Eds) "Subsurface imaging and sediment characterisation in shallow water environments" Deltech special volume, accepted.

Masson O., Eyrolle F., Boullier V. et Antonelli C., 2004 : Station observatoire 'Rhône aval' Réseau OPERA, Bilan de fonctionnement sur la période 2000 - 2003 et perspectives, Rapport DEI/SESURE n° 2004-05.

Marsaleix P., Estournel C., Kondrachoff V. and R. Vehil, 1998 : A numerical study of the formation of the Rhone river plume. *Journal of Marine Systems.*, 14, 99-115.

Miralles J., Arnaud M., Radakovitch O., Marion C., Cagnat X., 2006 : Radionuclide deposition in the Rhône River prodelta (NW Mediterranean sea) in response to December 2003 extreme flood. *Marine Geology*, 234, 179-189.

Petrenko A., Leredde Y. and P. Marsaleix, 2005 : Circulation in a stratified and wind-forced Gulf of Lions, NW Mediterranean Sea : in-situ and modeling data. *Continental Shelf Research*. 25, 7-27.

Pinazo C., Marsaleix P., Millet B., Estournel C., Kondrachoff V. and R. Véhil. 2001: Phytoplankton variability in summer in the northwestern Mediterranean: modelling of the wind and freshwater impacts. *Journal of Coastal Research*. 17, 1, 146-161.

Provansal M., Arnaud-Fassetta G., Vella C., 2004 : Géomorphologie du delta du Rhône. *Bulletin d'Archéologie de Provence*, éd. APA, supplément 2, 59-63.

Provansal M., Vella C., Arnaud-Fassetta G., Sabatier F. Maillet G., 2003 : Role of fluvial inputs in the mobility of the Rhône delta coast (France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 271-282.

Radakovitch O., Charmasson S., Arnaud M., Bouisset P., 1999 : ²¹⁰Pb and caesium accumulation in the Rhône delta sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 48, 77-92.

Reffray G., Fraunié P. and P. Marsaleix, 2004 : Secondary flows induced by wind forcing in the Rhône region of freshwater influence. *Ocean Dynamics*, 54, 179-196.

Rolland B., Eyrolle F. and Bourlès D., 2004 : The significance of floods in the transfer of suspended matter and associated radioactivity from the Rhone River toward the Mediterranean Sea, International Conference on Isotopes in Environmental Studies - Aquatic Forum, Monte Carlo, Monaco, 25-29 October 2004.

Sabatier F., Maillet G., Provansal M., Fleury T., Suanez S. and Vella C., 2006 : Sediment budget of the Rhône delta shoreface since the middle of the 19th century. Marine Geology, Volume 234, Issues 1-4, 18 December 2006, 143-157.

Vella C., 2004 : Le rôle de la mer : position du niveau marin et du trait de côte depuis 6000 ans dans le delta du Rhône. Bulletin d'Archéologie de Provence, éd. APA, supplément 2, 79-90.

Vella C., Fleury T., Raccasi G., Provansal M., Sabatier F. and Bourcier M., 2005 : Evolution of the Rhône delta plain in the Holocene. Marine Geology, Volumes 222-223, 15 November 2005, 235-265.

ANNEXE 1 : FINANCEMENT DU PROJET

ANNEXE FINANCIERE DU PROJET

En Région PACA

ORGANISME DEMANDEUR : IRSN

INTITULE DU PROJET : **CARMA**

Durée du projet 24 mois

TABLEAU FINANCIER RECAPITULATIF DU PROJET en K€ HT

COUT DU PROJET (1)			FINANCEMENT								
			Agence de l'Eau RM&C		REGION Provence-Alpes- Côtes d'Azur		Autofinancement			U.E et Autres organismes internationaux	
DEPENSES	MONTANT GLOBAL	REGIME DE TVA	MONTANT	(2)	MONTANT	(2)	NOM	MONTANT	(2)	NOM+PROGRAMME	MONTANT
Personnel, équipement, fonctionnement, sous- traitance	276.8	HT	48.5 (3) 17.5 %	A	59.5 29.5 Total : 89 32.2 %	A A	IRSN	112.8 40.8 %	A	FEDER	26.5 9.6 %

(1) Coût sur les 2 années du projet.

(2) A = Acquis / S = Sollicité

(3) non prévu initialement sur le plan de financement transmis à la Région, il s'agit d'un complément accordé par l'Agence de l'eau

ANNEXE 2 : DEPENSES ENGAGEES PAR L'IRSN POUR LE PROJET

Dépenses engagées par l'IRSN pour le projet CARMA

Désignation	Entreprise	Montant en €
Fonctionnement		en TTC
piles lithium LS14500	Radiospares	1146,73
prestation In-Vivo	IN VIVO	9328,80
études préparatoires ADHOC Vision	ADHOC-VISION	7899,58
	Total partiel :	18375,11
Investissement		en HT
Sondes multiparamètres	NKE Instrumentation	19950,00
largueur petits fonds	IXSea	3325,00
cage anti-chalut	IN VIVO	2941,00
achat ADCP	Technitrade	25678,11
6 altimètres ALTUS	NKE Instrumentation	42090,00
	Total partiel :	93984,11
	TOTAL :	112359,22

ANNEXE 3 : COORDONNEES DES PARTENAIRES DU PROJET

EN MIDI-PYRRENEES :

Pôle d'Océanographie Côtière (POC) de l'Observatoire Midi-Pyrénées : Laboratoire d'Aérodologie (LEGOS)

14 avenue Edouard Belin

31400 Toulouse

Tel : + 33 (0) 5 61 33 27 77

Interlocuteur : Claude Estournel

Mel : Claude.Estournel@aero.obs-mip.fr

NOVELTIS

Parc Technologique du Canal

2, avenue de l'Europe

31520 Ramonville-Saint-Agne

Tel : +33 (0) 5 62 88 11 09

Interlocuteur : Muriel Lux

EN PACA :

CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'environnement)

BP 80

13545 Aix en Provence cedex 04

Tel : 04 42 97 15 76 / 77

Fax : 04 42 97 15 59

Interlocuteurs : François Sabatier ; Claude Vella

Mel : Sabatier@cerege.fr, Vella@cerege.fr

IN-VIVO Environnement

IN-VIVO Environnement est implanté sur deux sites en France :

IN VIVO, ENVIRONNEMENT, ZA la Grande Halte

29 940 La Forêt – Fouesnant, Bretagne, France

Tél. : (33).2.98.51.41.75

Fax. : (33).2.98.51.41.55

IN VIVO MEDITERRANEE, Avenue de Saint-Jean

13 600 La Ciotat, PACA, France

Tél. (33).4.42.71.31.25

Fax : (33).4.42.08.04.65

E-mail : info@invivo-environnement.com

Site Web : www.invivo-environnement.com

Interlocuteur : Philippe BORNENS

ADHOC-VISION

Adresse postale : B.P 10004

13191 Marseille cedex 20

Siège : 7 avenue André Roussin, Le Ponant Littoral, Bât. F

13016 Marseille

Tél. 04 91 62 55 19 ou 04 91 09 05 72

Fax 04 91 50 52 66

Email : franck.wattel@adhocvision.com

Interlocuteur

:

Franck

Watte

ANNEXE 4 : PLANNING DU PROJET

	2005												2006												2007		
Projet CARMA	mars	avri	mai	juin	juill	août	sept	oct	nov	déc	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juill	août	sept	oct	nov	déc	jan	fév	mars		
Proposition et financement :																											
Réponse IRSN appel d'offre PACA	31																										
Audition du Projet à Sète					12																						
Notification acceptation projet									28																		
Notification investissement 36 500 €												16															
Notification fonctionnement 23 000 €												16															
Demande labelisation Pôle Mer													16														
Renouvellement deuxième année													31														
Notification deuxième année																											
Dépôt dossier FEDER															10												
Notification acceptation FEDER																											
Dépôt dossier Agence de l'eau															19												
Notification aide Agence de l'eau 48 500 €																			11								
Justificatif de dépenses pour PACA																					22						
Réunions :																											
Réunion enclenchement Sète													2														
Réunion programme travail thèses																19											
réunion avancement															5												
Mémo avancement 1																	28										
Mémo avancement 2																			7								
Mémo avancement 3																				5							
Mail avancement 4																							23				
Mail avancement 5																								2			
Essais :																											
essai ALTUS à partir de la plage																	13										
essai ALTUS en mer																			20								
essai mise à l'eau bouées Roustan																				23							
essais en labo des ALTUS																											
Equipement :																											
réception altimètres																				11							
réception ADCP																											
réception cage anti-chalut																				28							
réception piles																											
réception sondes NKE																					9						
Missions :																											
Mission Sète (5 IRSN)													2														
Mission CEREGE (3 IRSN)																19											
Mission Perpignan 1 (2 IRSN)																	6-7										
Mission Perpignan 2 (2 IRSN)																				27							
Mission Port Saint Louis 1 (2 IRSN)																				20							
Mission plage de la Gracieuse (1 IRSN)																	13										
Mission Port Saint Louis 2 (6 IRSN)																					23-25						
Mission Martigues 1 (5 IRSN)																					8-9						
Mission Port Saint-Louis 3 (4 IRSN)																					20-21						
Mission Port de Bouc (1 IRSN)																					30						
Mission Port Saint-Louis 3 (2 IRSN)																						12					
Mission Martigues 2 (6 IRSN)																							18				
Mission Port Saint-Louis 5 (4 IRSN)																							25				
Mission Port Saint-Louis 6 (3 IRSN)																								6			
Mission Port Saint-Louis 7 (4 IRSN)																									8		

	2005										2006										2007				
Projet CARMA	mars	avri	mai	juin	juill	août	sept	oct	nov	déc	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juill	août	sept	oct	nov	déc	jan	fév	mars
Mise à l'eau de l'instrumentation :																									
demande autorisation PREMAR																			25						
réponse PREMAR																				6					
mise à l'eau altimètre Roustan Sud																				24					
annonce mouillages à la prud'homme																					7				
mise à l'eau ADCP 20m et 40m, altimètre Roustan est																					9				
mise à l'eau altimètres chenaux																					20				
mise à l'eau altimètres Rhône																					21				
information des chalutiers à Port- de Bouc																					30				
déplacement altimètre Rhône																								8	
Récupération des données :																									
récupération des données altimètres Rhône																						12			
récupération données altimètre Roustan est																							18		
récupération des données altimètres Rhône																								6	
Campagne en mer sur NO Europe :																									
demande de campagne en mer CARMEX 2007															4										
acceptation de campagne CARMEX																					9				
campagne CARMEX																									
réunion IFREMER armement mise en place mission mer																							12		
demande d'intervention en plongée																									
demande d'utilisation de carottiers spécifiques																									
demande de matériel du parc INSU																									
Rapports et valorisation:																									
Repère 8																									
repère 10																									
Rapport Scientifique et technique 2005																									
Rapport d'avancement 2006																									

ANNEXE 5 : SCHEMAS D'IMPLANTATION DES MOUILLAGES NECESSAIRES AUX ADCP

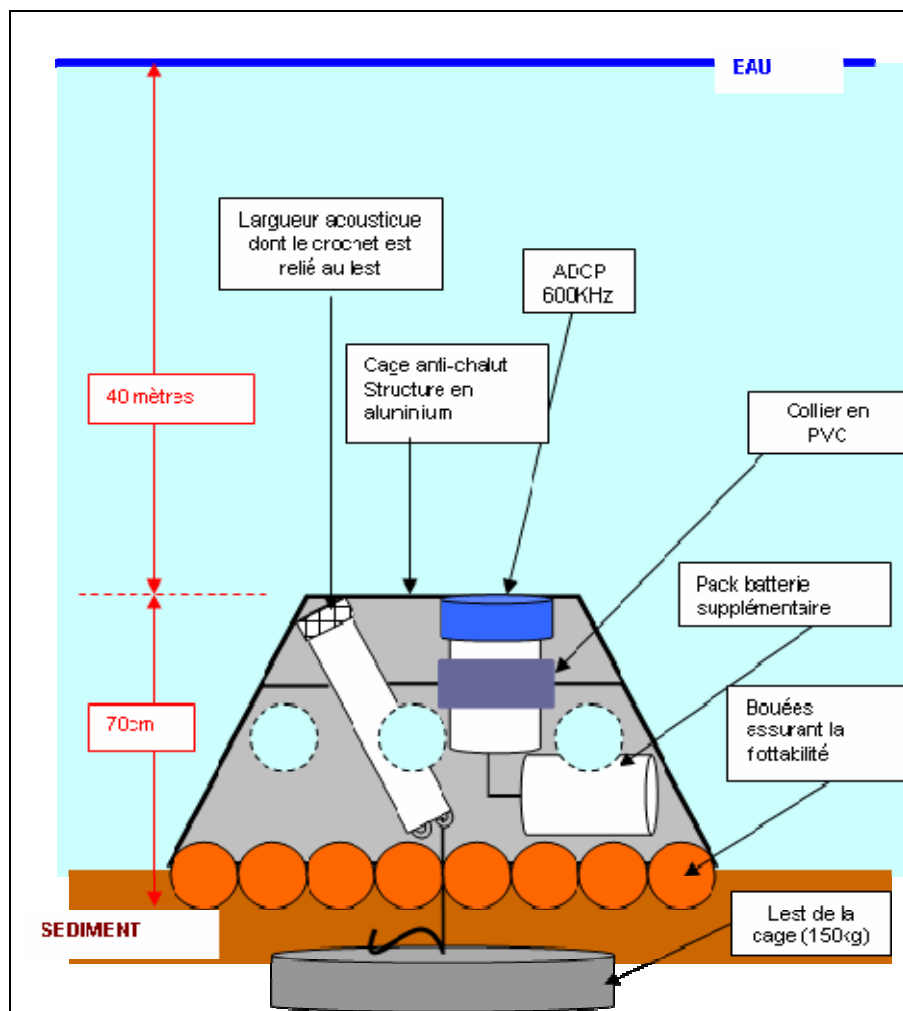


Schéma de mouillage de l'ADCP située à 40 m de profondeur

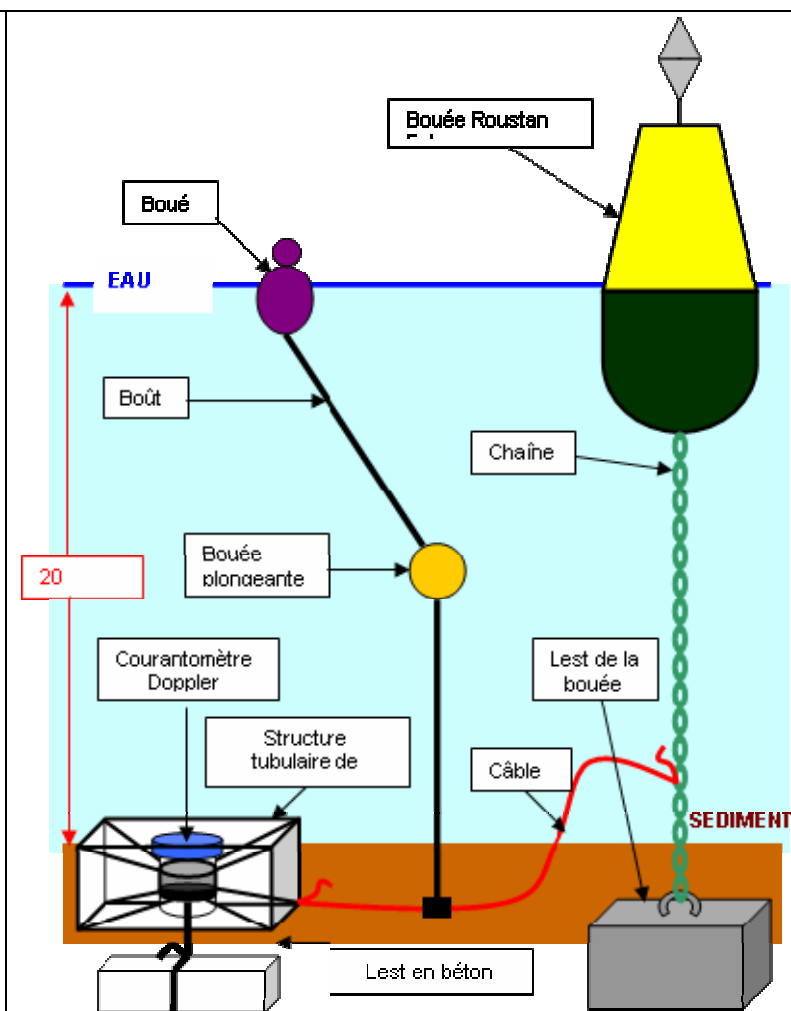


Schéma de mouillage de l'ADCP située à 20 m de profondeur

ANNEXE 6 : COORDONNEES DES STATIONS INSTRUMENTEES

WGS 84								
Date mise à l'eau	Station	Long-DD	Lat-DD	D-Lat	Min-Lat	D-Long	Min-Long	Profondeur de la station (zone en m)
24/10/2006	Altimètre 1 sud	4,8456	43,3130	43	18,779	4	50,7350	16
09/11/2006	ADCP20 m	4,8665	43,3197	43	19,1794	4	51,9871	19
09/11/2006	ADCP40m	4,8705	43,3126	43	18,7547	4	52,2314	43
09/11/2006	Altimètre 2 Roustan Est	4,8665	43,3197	43	19,1796	4	51,9923	19
20/11/2006	Altimètre 3 Hchenal20m	4,8528	43,3137	43	18,8208	4	51,1704	19
20/11/2006	Altimètre 4 Chenal 20 m	4,8537	43,3138	43	18,8292	4	51,2214	18
21/11/2006	Altimètre 5 Rhône 1	4,8108	43,3769	43	22,6134	4	48,6480	10
21/11/2006	Altimètre 6 Rhône 2	4,8107	43,3768	43	22,6104	4	48,6432	8,5

ANNEXE 7 : QUELQUES PHOTOS DES INTERVENTIONS SUR LE TERRAIN



Altimètre monté sur son support trépieds.



Altimètre implanté dans le Rhône sur une structure en fers à béton.



Les largueurs utilisés pour les altimètres en mer



Les ancrs à vis servant à fixer les altimètres au fond en mer



Bouées de repérage en surface de l'ADCP de 20 m



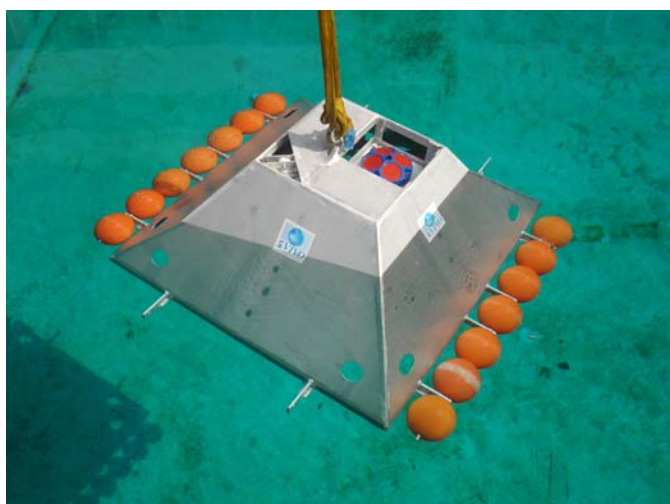
Les embarcations utilisées pour les interventions terrain



La barge louée pour la mise à l'eau des ADCP



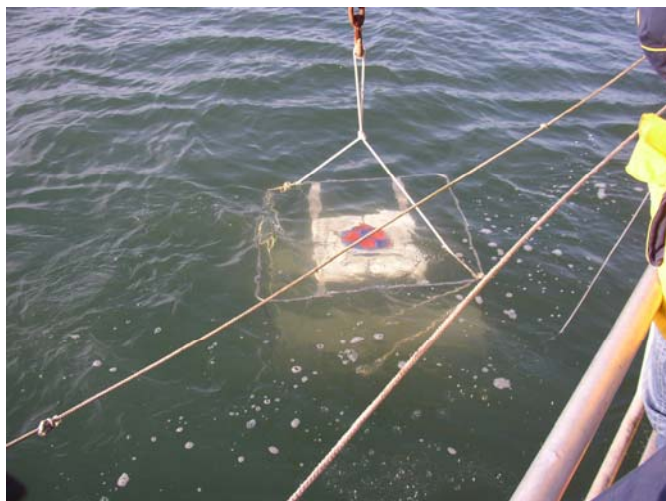
Les deux ADCP dans leurs structures de protection



Essai du système cage anti-chalut - ADCP dans le bassin d'essai à La Seyne sur mer



Essai de largage du système cage anti-chalut - ADCP



Mise à l'eau de l'ADCP de 20 m



Mise à l'eau de l'ADCP de 40 m