

IRSN

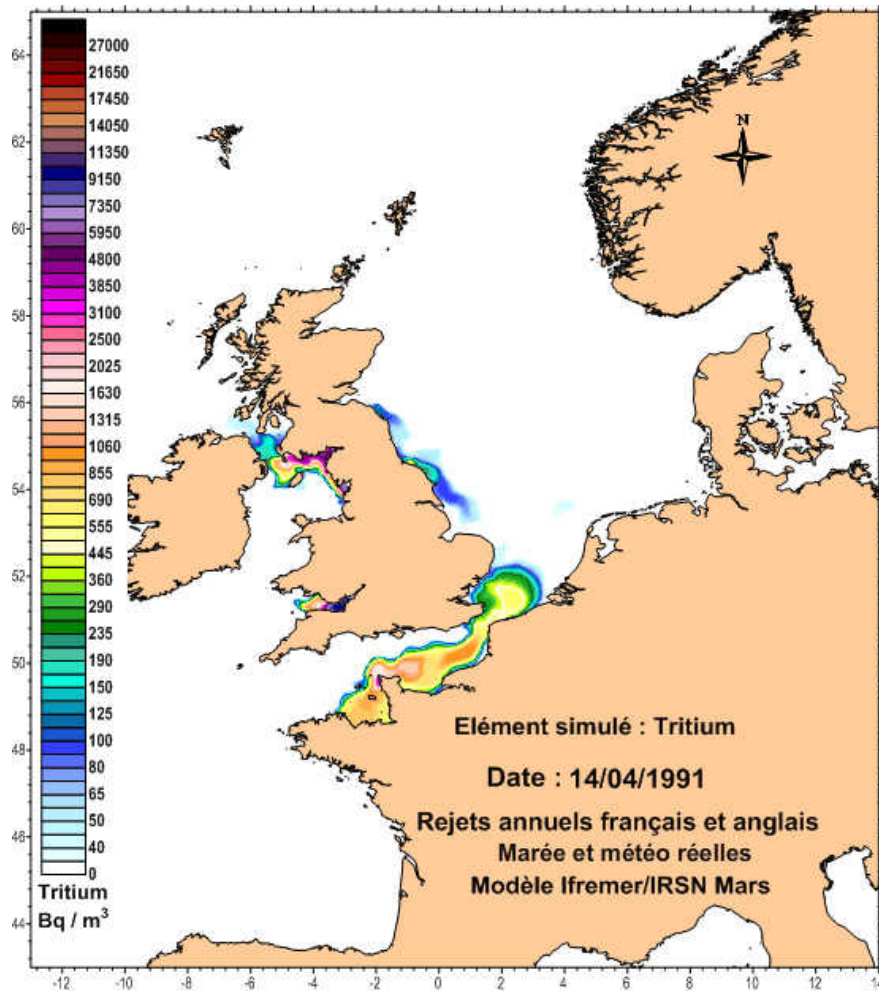
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Mémoire d'habilitation à diriger des recherches

Dispersion des radionucléides dans les mers du nord-ouest de l'Europe : observations et modélisation

Pascal BAILLY DU BOIS



ÉDITORIAL

Lorsque je croise la mission de surveillance radiologique de l'Institut, appliquée au milieu marin, et la formidable complexité de ce compartiment, hautement symbolique pour l'environnement de notre planète, j'esquisse l'ampleur de la tâche à laquelle s'est attelée Pascal BAILLY du BOIS. Il ne suffit pas pour l'Institut de collectionner, comme des papillons, des séries de mesures de radioactivités que la force des courants aide à disperser le long de nos côtes pour faire une bonne surveillance. Quel sens en termes d'évaluation des risques ? Quels mécanismes sont à l'œuvre que nos capteurs – nécessairement limités en nombre – ne peuvent déceler sans un guidage pertinent ?

Le travail de Pascal BAILLY du BOIS nous aide à y voir clair : devant ces interrogations, les propriétés physiques des radionucléides – remarquables traceurs – ont permis d'amener la dispersion en solution à la maturité scientifique : une étape marquante à mes yeux, et porteuse de connaissances utiles bien au-delà de la radioprotection. De nombreuses pistes d'amélioration sont ouvertes pour renforcer cette maturité, mais Pascal BAILLY du BOIS lève le voile sur d'autres défis essentiels : le transport sédimentaire et particulaire d'une part, et les mécanismes d'échanges avec les espèces vivantes. Relâchements, accumulations, transferts : chacun peut mesurer que de tels mécanismes pèsent lourds dans les hypothèses. Leur compréhension et quantification sont donc des clefs essentielles pour une bonne estimation de l'exposition, préalable indispensable à une évaluation posée des risques. C'est à ce prix que l'Institut pourra tendre vers l'excellence d'une compréhension globale des « phénomènes migratoires » des radionucléides relâchés dans la mer vers les fonds ou jusqu'aux espèces vivantes, voire vers l'homme. D'ici là, comme Pascal BAILLY du BOIS en souligne d'ailleurs toute l'importance, les mesures que les métrologistes, leurs capteurs et leurs bateaux ramèneront dans leurs « filets » n'ont pas encore fini de nous surprendre ou de nous interpeller.

L'habilitation à diriger les recherches (HDR) est un diplôme délivré par un établissement universitaire. Pour un chercheur, elle constitue la consécration d'un cycle - typiquement d'une dizaine d'année - d'activité de recherche remarquable dans son domaine et une double reconnaissance : bien sûr, celle de l'atteinte d'un haut niveau scientifique, mais surtout celle de la capacité à impulser un ensemble cohérent de travaux articulés au service d'un défi scientifique. Cette reconnaissance

renforce également l'aptitude à encadrer des étudiants en formation doctorale ou postdoctorale. Elle est précieuse tant pour les chercheurs que pour l'Institut, compte tenu de sa volonté de multiplier les configurations de partenariat où la vision scientifique à moyen terme joue un rôle déterminant.

Un lecteur attentif de notre collection des HDR ne manquerait pas de souligner que la vitalité de la recherche d'un laboratoire, que traduit le passage d'une telle habilitation, est particulièrement bouillonnante en radioécologie marine, puisque c'est la seconde HDR en peu de temps pour le [Laboratoire de radiochimie de Cherbourg-Octeville](#) !

Ainsi, je suis honoré de présenter, au nom de l'Institut, ce septième numéro de la [collection HDR](#). Il concrétise la volonté d'une mise en lumière des travaux de recherche de l'Institut, attendue par différentes parties prenantes de la gestion des risques nucléaires et radiologiques et s'adresse plus largement à la communauté académique.

Je remercie donc tout particulièrement Pascal BAILLY du BOIS de me donner cette opportunité, à l'occasion de cette étape importante de sa carrière scientifique.

Matthieu Schuler,
Directeur de la stratégie, du développement et des partenariats
Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
Novembre 2014

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes sans qui le travail présenté ici n'aurait pas été possible, avec par ordre chronologique :

Jacques Vigneron et Pierre Thuillier, enseignants de la Maîtrise de protection de l'environnement à [Paris VII](#).

Toute l'équipe du [Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville](#) qui m'a soutenu et accompagné à terre et en mer depuis 1988, en particulier Pierre Guéguéniat, Pierre Germain, Dominique Boust, directeurs du laboratoire, Colette Leconte, Marianne Lamotte, Serge Le Cavalier, Rémi Gandon, Marianne Rozet, Claire Voiseux, Bruno Fiévet, Didier Hébert, Olivier Connan, Denis Maro et Mehdi Morillon.

Les métrologistes sans qui les mesures de radioactivité ne seraient pas possibles : René Léon et Luc Solier au [LRC](#), Yves Baron du Groupe d'études atomiques de la [Marine nationale](#), le [LMRE](#) de l'[IRSN](#) et le [SMSRB](#) du [CEA](#).

Les équipes de l'[Ifremer](#) pour la richesse de leur accompagnement scientifique, en particulier Thomas Belsher, Jean-Claude Salomon, Franck Dumas, Philippe Cugier, Pierre Garreau, Michel Lunven, Philippe Riou et Romain Legendre.

La communauté scientifique solidaire des équipes des laboratoires océanographiques de la Manche dans les [universités de Rouen](#), Robert Lafite et Sophie Le Bot, [Cherbourg](#) - Bertrand Pouderoux, [Lille](#) - Michel Wartel, [Brest](#) - Bernard Le Cann et à la [station biologique de Roscoff](#), Louis Cabioch et Pascal Morin.

Les collègues du [CEFAS](#) à Lowestoft, en particulier Kins Leonard, Peter Kershaw et John Hunt, les équipes du [RPII](#) et de l'[université de Dublin](#), Peter Mitchell, Tom Ryan et Luis Leon Vintro, Henning Dahlgaard du [Riso Laboratory](#) au Danemark et Jürgen Hermann au [BSH](#) à Hambourg.

Les membres de la [Flotte océanographique](#) côtière et hauturière française et européenne, en particulier les équipages du [Pluteus](#), du [Côte d'Aquitaine](#), du [Côtes de la Manche \(INSU/CNRS\)](#), du [Cryos](#), du [Noroît](#) et du [Suroît \(Ifremer/Genavir\)](#).

Tous les stagiaires et thésards qui m'ont apporté leur précieuse aide : José Pommard, Éric Douez, Karine Thorat, Éric Blain, Xavier Ozouf, Caroline Struski, Fabrice Nozière, Geoffrey Guth, Caroline Olivier, Johnny Legendre, Olivier Blanpain, Guillaume Bacon, Émilie Poulain, Sandra Desplats, Pauline Defenouillère et Éric Méaux.

Les ingénieurs et techniciens d'[AREVA-NC](#), en particulier Serge Le Bar, Michel Arnaud et Hervé Deguette.

Et enfin tout cela n'aurait pas été possible sans la patience et le soutien au quotidien de Sylvie Salvagnac et de nos enfants Lise, Julia, Diane et Clara.



Université de Rouen
Habilitation à diriger des recherches
(HDR)

Dispersion des radionucléides dans les mers du nord-ouest de l'Europe : observations et modélisation

11 octobre 2013

Pascal BAILLY DU BOIS
Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

Composition du jury :

Directeur scientifique :

Robert Lafite PU, UMR CNRS 6143 M2C, université de Rouen

Rapporteurs :

Pascal Morin HDR, UMR CNRS 7144 ADMM, CNRS

Philippe Jean-Baptiste Docteur d'état, UMR CNRS 8212 LSCE, CEA

Bruno Blanke Directeur de recherche, UMR CNRS 6523 LPO, CNRS

Examineurs :

François Marin PU UMR CNRS 6294 LOMC, université du Havre

Dominique Boust Docteur d'état, Laboratoire de radioécologie
de Cherbourg-Octeville, IRSN

Invité :

Pascal Lazure Laboratoire DYNECO/PHYSED, Ifremer

Illustration en page de couverture : simulation prenant en compte les rejets réels de tritium des installations nucléaires françaises et anglaises de 1991 à 2005.

ISBN 978-2-954237-2-9

©2014, IRSN. Tous droits réservés.

SOMMAIRE

	Chapitre 1			Chapitre 6	
Introduction		11		Développements et réponses institutionnelles	66
	Chapitre 2			6.1 Programmes européens et communications	67
Dispersion des radionucléides en mer		14		6.2 Groupe radioécologie Nord-Cotentin, comparaison modèles/mesures de radionucléides en milieu marin	68
2.1 Mesure de la radioactivité dans l'eau de mer		15		6.3 Crise, outils opérationnels	68
2.2 Campagnes océanographiques hauturières		17		6.4 L'accident de Fukushima	70
2.2.1 Cartographie et exploitation quantitative des résultats		23		6.5 Vulgarisation	70
2.3 Circulation et mélanges des masses d'eaux en mer du Nord		24		Chapitre 7	
2.4 Durées de transit et flux des masses d'eau de la Manche vers la mer du Nord		27		Perspectives de projets scientifiques	73
2.5 Dispersion moyenne et bilan des radionucléides dissous en Manche		31		7.1 Méthodes génériques	74
2.6 Circulation des masses d'eaux entre la mer d'Irlande et la Manche		33		7.2 Meilleure connaissance de l'hydrodynamique	74
	Chapitre 3			7.2.1 Spatialisation du frottement sur le fond	75
Validation de modèles hydrodynamiques par les radiotraceurs solubles		35		7.2.2 Frottement du vent sur la mer	75
3.1 Dispersion en Manche et dans le sud de la mer du Nord		37		7.2.3 Fluctuations du niveau moyen	76
3.1.1 Paramètres du modèle		39		7.2.4 Turbulence à l'échelle 1-100 mètres	76
3.1.2 Critères de comparaison		39		7.2.5 La zone du cap de La Hague : un instrument pour l'étude de l'hydrodynamique	77
3.2 Champ proche d'un émissaire, 2D (programme Dispro)		42		7.3 Amélioration des modèles de dispersion	77
3.2.1 Mesure du radiotraceur		43		7.3.1 Paramétrisation automatique des modèles	77
3.2.2 Mesures physiques		44		7.3.2 Mer Celtique	77
3.2.3 Modèle hydrodynamique		45		7.3.3 Golfe de Gascogne	78
3.2.3.1 Conditions aux limites		46		7.3.4 Amélioration du modèle de courants résiduels	78
3.2.3.2 Bathymétrie automatique pour les modèles		47		7.4 Transferts vers les compartiments biologiques et sédimentaires	79
3.2.4 Calage physique du modèle		49		7.5 Transport sédimentaire	79
3.2.4.1 Levés marégraphiques		50		7.6 Outils pour la crise marine	80
3.2.4.2 Flotteur dérivant comme courantomètre mobile		51		7.6.1 Prévision actualisée de l'état radiologique du milieu marin	81
3.2.5 Comparaisons des concentrations mesurées et simulées		51		7.7 Échanges mer-atmosphère	82
3.2.6 Conclusion de la validation 2D en champ proche		52		Chapitre 8	
3.3 Validation 3D de la dispersion dans le champ proche d'un émissaire (programme Disver)		55		Conclusion	83
3.3.1 Prélèvement dynamique en profondeur		55			
3.3.2 Premiers résultats		57		Chapitre 9	
	Chapitre 4			Présentation personnelle	85
Modèles de transfert de radionucléides		60		9.1 <i>Curriculum vitae</i>	85
	Chapitre 5			9.2 Publications classées	96
Transport sédimentaire		62		9.2.1 Articles dans des revues internationales ou nationales à comité de lecture (ACL)	96
5.1 Conditions initiales pour les modèles hydrosédimentaires		62		9.2.2 Articles dans des revues avec comité de lecture non répertoriées par l'AERES ou dans des bases de données internationales (ACLN)	100
5.2 Construction d'un modèle de transport des sédiments grossiers hétérométriques		63		9.2.3 Conférences données à l'invitation du comité d'organisation dans un congrès national ou international (C-INV)	100
5.3 Observation du transport sédimentaire <i>in situ</i> (DYSPI)		63		9.2.4 Communications avec actes dans un congrès international (C-ACTI)	100
				9.2.5 Communications avec actes dans un congrès national (C-ACTN)	102
				9.2.6 Communications par affiche dans un congrès international	

	ou national (C-AFF)	103
9.2.7	Ouvrages scientifiques (OS)	104
9.2.8	Publications de vulgarisation (PV)	105
9.2.9	Publications de transfert (PT)	105
9.2.10	Autres productions (AP)	107
9.2.11	Bases de données	108
	Bibliographie	109
	Annexes	125

Chapitre 1 Introduction

Depuis 1945, des quantités importantes de radionucléides artificiels ont été introduites par l'homme dans la biosphère suite aux essais nucléaires atmosphériques et au développement de l'industrie nucléaire militaire et civile. Le milieu marin est un réceptacle de ces rejets notamment *via* :

- les retombées atmosphériques ;
- les rejets directs à partir d'installations côtières ou de bâtiments en mer ;
- par l'intermédiaire des fleuves collectant des rejets liquides et les retombées atmosphériques sur leurs bassins versants.

Ces apports ont concerné l'ensemble du globe et leur conséquences ont été mesurées à l'échelle des mers et des océans par différents chercheurs (Andrié and Jean-Baptiste, 1988 ; Aoyama and Hirose, 2003 ; Dahlgaard *et al.*, 1995 ; Germain *et al.*, 1997 ; Göte-Östlund *et al.*, 1974 ; Guéguénat *et al.*, 1996 ; Kautsky, 1986 ; Kautsky *et al.*, 1984 ;

Kershaw *et al.*, 1999 ; Mitchell and Steele, 1988 ; Nies *et al.*, 1999 ; Povinec *et al.*, 2010 ; Schlosser *et al.*, 1999 ; Watanabe *et al.*, 1991). Les marquages mesurés ont montré l'intérêt des traceurs radioactifs comme outils pour connaître le cheminement et la dispersion des masses d'eaux océaniques. Ils ont permis de mettre en évidence, confirmer et quantifier certains processus au sein et entre les différents compartiments de l'écosystème marin (Boust *et al.*, 1988 ; Fiévet and Plet, 2002 ; Fiévet *et al.*, 2013 ; Kershaw and Woodhead, 1991 ; Lesueur *et al.*, 2001 ; Lindahl *et al.*, 2010 ; Mitchell *et al.*, 2001).

Dans ce contexte international, mes thématiques de recherche ont essayé de répondre plus spécifiquement aux questions sur :

- la dispersion des radionucléides dans l'eau de mer et leur utilisation comme traceurs des masses d'eaux ;
- la validation de modèles hydrodynamiques de dispersion à différentes échelles spatio-temporelles dans une mer mégatidale ;
- la connaissance et la simulation du transport sédimentaire nécessaire à la connaissance des flux et des stocks de radionucléides piégés dans les sédiments ;
- les transferts vers les espèces vivantes.

Certains programmes n'ont pu être réalisés qu'en imaginant et construisant une instrumentation ou des développements techniques spécifiques, les plus marquants seront présentés dans ce mémoire. L'exploitation des mesures de radiotraceurs et les outils développés ont mis en évidence des phénomènes et mécanismes non mesurables par une approche classique. Les résultats acquis ont amélioré significativement la connaissance de l'hydrodynamique de mers mégatidales.

Les connaissances acquises débordent le cadre de la radioprotection et de nombreux résultats sont applicables à d'autres domaines ou substances transportées par l'eau de mer. Mon cursus universitaire m'a conforté dans l'idée que la connaissance et les recherches concernant l'environnement nécessitaient une approche globale dans le temps et dans l'espace. J'ai eu la chance de pouvoir mettre en application cette démarche dans un laboratoire qui met en œuvre la pluridisciplinarité et autorise le suivi des radionucléides dans tous les compartiments de l'environnement.

Les travaux s'intègrent dans les thématiques de l'[Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire](#) afin de connaître, reconstituer et prévoir le devenir des radionucléides artificiels sur le plateau continental du nord-ouest de l'Europe. Ces objectifs ont rejoint les questions posées par les exploitants de l'usine de recyclage de combustibles nucléaires d'[AREVA-NC](#) sur le site de La Hague, qui ont rendu possible une large part des travaux présentés.

Les modèles développés et validés ont trouvé leur application logique au sein d'outils opérationnels permettant de simuler la dispersion et les transferts de rejets anthropiques en situation normale ou accidentelle.

Ce document présente les principales recherches que j'ai entreprises, la liste des références renvoie vers le détail des travaux. Les principales publications citées sont jointes en annexe.

Les résultats acquis ont fourni des outils et ouvert des perspectives aux thématiques abordées. Des thèmes de perspectives de recherches sont présentés au regard de la connaissance actuelle et des enjeux futurs.

Les travaux ont été réalisés en collaboration avec l'[Ifremer](#), les [universités de Rouen, Caen, Lille et Brest](#), les équipes du [CNRS](#) à Roscoff et à Brest, le Groupe d'études atomiques de la [Marine nationale](#) à Cherbourg, l'[INTECHMER](#), le [CEA/SMSRB](#), le [CEA/LSCE](#), le [BRGM](#), les [laboratoires de métrologie et de radioécologie](#) de l'[IRSN](#), le [CEFAS](#) à Lowestoft (Grande-Bretagne), le [BSH](#) à Hambourg (Allemagne), le [RPII](#) et l'[université de Dublin](#) (Irlande), le [laboratoire de Riso](#) (Danemark). Les moyens nautiques ont été fournis par l'[INSU/CNRS](#), l'[Ifremer/Genavir](#), le [CEFAS](#) à Lowestoft et le [BSH](#) à Hambourg (Allemagne). Un soutien technique et financier a été apporté par [AREVA-NC](#) et l'[Union européenne](#) et la [région Basse-Normandie](#).

CHAPITRE 2

Dispersion des radionucléides en mer

Les recherches accomplies sur la dispersion en mer ont exploité les particularités des radiotraceurs artificiels pour améliorer la connaissance du déplacement des substances dissoutes dans les mers du nord-ouest de l'Europe, en particulier la Manche, la mer du Nord, la mer Celtique et la mer d'Irlande. À ces échelles, voici les principaux atouts de ces traceurs :

- les principales sources de radionucléides artificiels sont peu nombreuses et bien quantifiées (usines de retraitement de combustibles nucléaires de Sellafield en mer d'Irlande et de La Hague en Manche, centrales nucléaires) et les cocktails de radionucléides rejetés permettent de les différencier ;
- les radionucléides artificiels en solution dans l'eau de mer peuvent être mesurés jusqu'à plus de mille kilomètres de leur point d'émission. Les méthodes mises au point pour les mesurer permettent de détecter des concentrations 10 000 fois plus faibles que la radioactivité naturelle ;

- parmi les radionucléides rejetés, certains ont un comportement essentiellement ou strictement soluble dans l'eau de mer, alors que d'autres ont une plus grande affinité pour les particules sédimentaires ou les espèces vivantes. Ces différences de comportement permettent de suivre leur devenir au sein des différentes matrices de l'écosystème marin.

Ces caractéristiques ont été exploitées en s'appuyant sur des mesures synoptiques et répétitives réalisées lors de campagnes océanographiques.

2.1 Mesure de la radioactivité dans l'eau de mer

Les travaux que j'ai réalisés s'appuient sur la qualité et la quantité de données acquises *in situ*. Les mesures de radiotraceurs ont été rendues possibles grâce à la mise à disposition des moyens de la [flotte océanographique](#) côtière et hauturière française et européenne.

Rémi Gandon a fait progresser notablement la radiochimie des radionucléides en solution dans l'eau de mer au Laboratoire de radioécologie marine (LRM) (Gandon and Guéguéniat, 1992). Ces techniques ont été éprouvées et optimisées lors de campagnes océanographiques, de manière à pouvoir traiter en continu plusieurs dizaines d'échantillons de 120 litres par jour (co-précipitation, décantation par siphonage, séchage à bord des navires, [Bailly du Bois, 2012]).

Bien que la métrologie des radionucléides ait été assurée essentiellement par les métrologistes du [GEA](#) (Yves Baron) et du LRM - [LRC](#) (René Léon, puis Luc Solier), j'ai dû optimiser et automatiser certains traitements afin de répondre aux besoins d'acquisition de mesures reproductibles, à bas niveau et en grand nombre.

Un effort particulier a porté sur la validation des méthodes appliquées et la représentativité des mesures obtenues. Il a porté entre autres sur l'[antimoine 125](#) utilisé comme traceur conservatif des masses d'eaux depuis le centre de la Manche jusqu'au nord de la Norvège. Si les bilans réalisés ont pu confirmer le comportement soluble du ¹²⁵Sb à ces échelles, ils ont été précédés par des tests et des comparaisons systématiques réalisés dans l'eau de mer, les espèces vivantes et les sédiments (Gandon *et al.*, 1998). La mesure des radionucléides solubles émetteurs gamma a représenté l'essentiel des résultats obtenus lors des campagnes océanographiques réalisées jusqu'en 1998. Les résultats s'appuient sur plusieurs milliers de mesures à bas niveau d'échantillons de 120 L avec des durées de comptage de 8 à 48 h chacun. Ils ont concerné pour l'essentiel l'[antimoine 125](#), les [césiums 137](#) et [134](#), le ruthénium 106 et le [cobalt 60](#).

Suite à la diminution significative des rejets de ces radionucléides par les installations de Sellafield et de La Hague (figure 1), d'autres traceurs solubles ont été recherchés pour suivre la dispersion, comme le **technétium 99** et surtout le **tritium**. Ce dernier radionucléide est associé à l'eau du retraitement du combustible et n'est pas retenu par les procédés d'épuration mis en œuvre avant rejet. Les flux émis sont proportionnels à la quantité retraitée, ou à la production des centrales nucléaires côtières. Rejeté sous la forme HTO, le tritium va suivre le déplacement de la masse d'eau et représenter un traceur strictement conservatif. Lorsque les concentrations sont supérieures à 1 Bq.L^{-1} , il peut être détecté par scintillation liquide sur des prélèvements de 8 mL. Le tritium a été utilisé de manière intensive pour suivre la dispersion des rejets marqués dans le champ proche de l'émissaire d'**AREVA-NC** au large du cap de La Hague. Compte tenu du nombre de prélèvements nécessaires, la technique de mesure a été optimisée de manière à obtenir le meilleur rendement entre le nombre de désintégrations détectées et les perturbations associées au bruit de fond de l'appareil de comptage. Un traitement du signal à partir du spectre brut a également été mis au point afin de s'affranchir des incertitudes associées au logiciel de l'appareil. Ces optimisations ont rendu possible la mesure quantitative du tritium soluble en 50 minutes, avec une limite de détection de 7 Bq.L^{-1} avec des appareils classiques (Bailly du Bois *et al.*, 2012c). Plus de 40 000 échantillons ont été mesurés de cette manière de 2002 à 2012.

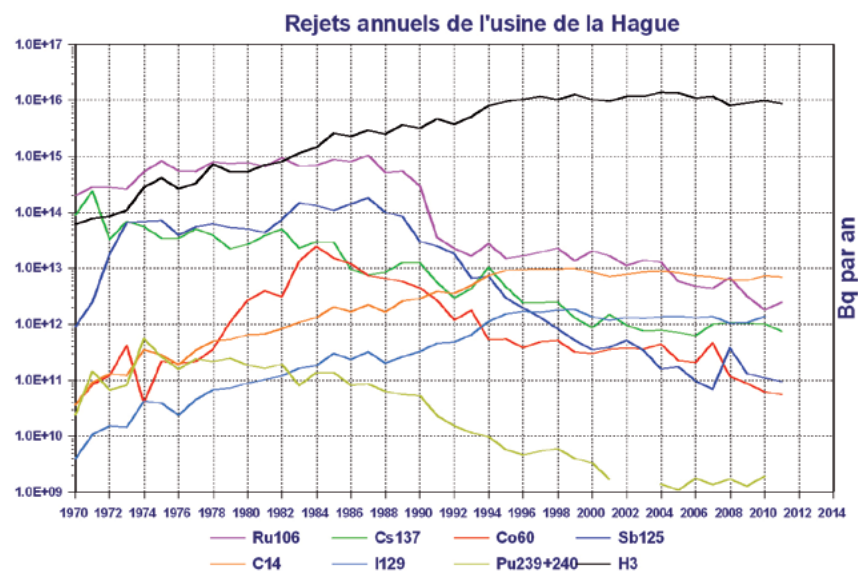


Figure 1. Rejets annuels liquides de l'usine AREVA-NC à La Hague.

D'autres techniques sont applicables pour mesurer le **tritium** océanique lorsque les concentrations sont inférieures à Bq.L^{-1} . L'essentiel des développements ont été réalisés avant 1995, ils concernent l'enrichissement électrolytique (Ostlund and Werner, 1962 ; Taylor, 1994) et la mesure de l'hélium 3 issu de la décroissance du tritium dans des ampoules scellées (Jean-Baptiste *et al.*, 1992 ; Jenkins *et al.*, 1991). J'ai utilisé la première technique en faisant appel au **CEA-SMSRB** avant 2000, puis la deuxième en faisant appel au Tritium Laboratory à l'**université de Miami**. L'**IRSN** est en train de se doter de moyens métrologiques avec cette dernière technique avec l'aide du **Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement** du CEA (LSCE). En m'inspirant de ce qui existe dans ce laboratoire, un système a été réalisé pour préparer les échantillons avant leur stockage en ampoules scellées (Desplats, 2012a, b). Ce système est destiné entre autres aux futurs programmes concernant l'utilisation du marquage en tritium issu de la Gironde et de la Loire pour valider les modèles hydrodynamiques de dispersion dans le Golfe de Gascogne (**chapitre 7.3.3**).

2.2 Campagnes océanographiques hauturières

De 1988 à 1998, j'ai exploité, organisé et participé, généralement en tant que chef de mission, à plus de 50 campagnes océanographiques en Manche, mer du Nord, mer Celtique, mer d'Irlande et atlantique du Nord-Ouest. Les campagnes en Manche ont utilisé les navires côtiers de l'**INSU-CNRS**, en particulier le Pluteus, le Côte d'Aquitaine et les Côtes de la Manche. Les zones du large ont été couvertes avec les moyens de l'**Ifremer/Genavir** (Cryos, Suroît, Noroît), des navires anglais (Cyrolana) ou allemands (Valdivia). Lors des campagnes hauturières les équipages scientifiques pluridisciplinaires associaient des laboratoires français ou étrangers de laboratoires universitaires, d'organismes de recherches ou institutionnels. Les lieux de prélèvement des principales campagnes hauturières réalisées ou exploitées sont présentés sur la figure 2. Le **tableau 1** liste les campagnes réalisées.

Ces campagnes ont permis de collecter plus de 3 000 échantillons de 120 L d'eau de mer et des dizaines de carottes de sédiments. Ces échantillons ont été analysés pour déterminer les concentrations en radionucléides artificiels avec les techniques mises au point au **LRC** pour la mesure des radionucléides émetteurs gamma (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{125}Sb , ^{106}Ru , ^{60}Co). Certains échantillons ont concerné la mesure du ^{99}Tc et des $^{238,239,240}\text{Pu}$. À partir de 1994, des mesures systématiques de tritium dissous ont été réalisées ; elles ont concerné la majeure partie des mesures à partir de 2000.

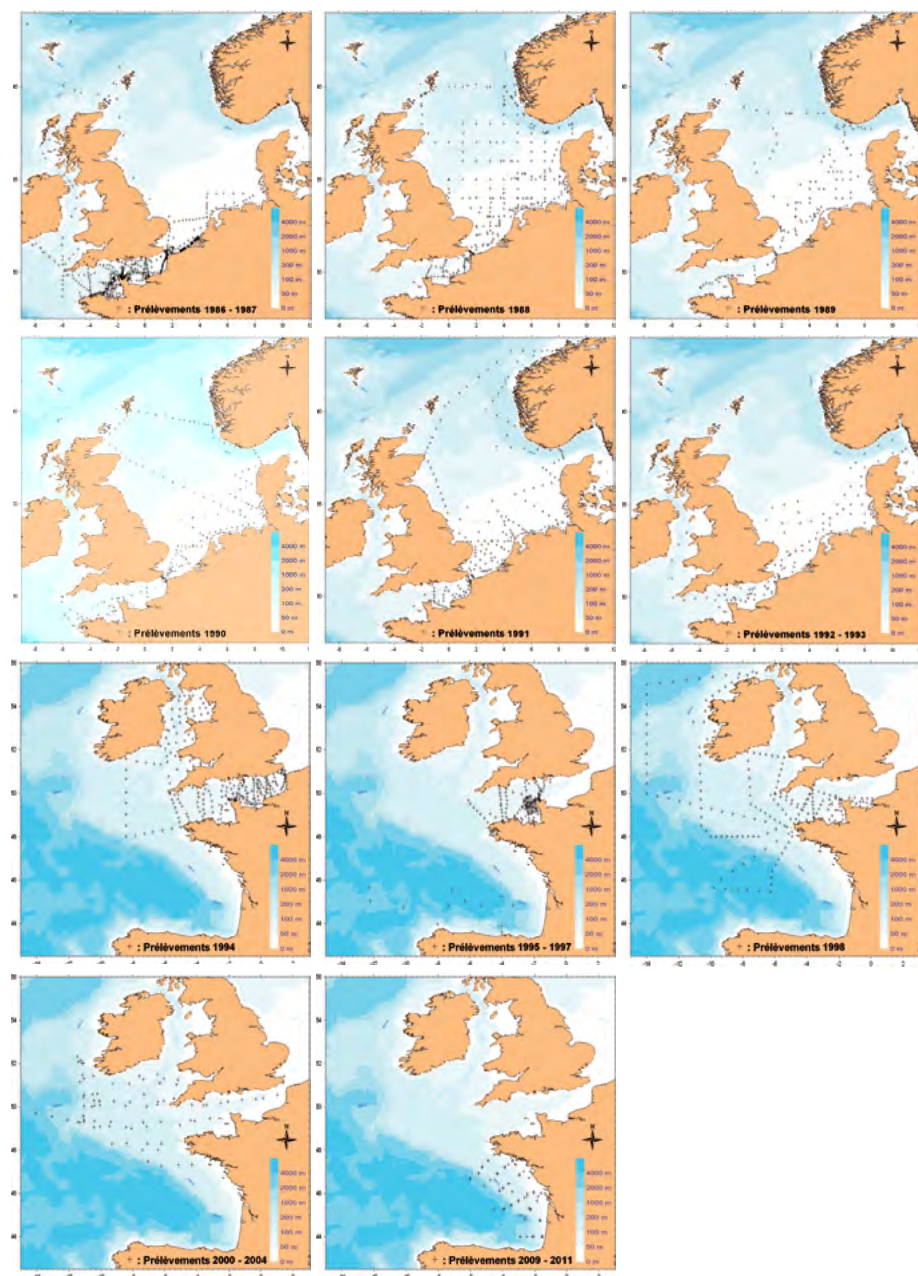


Figure 2. Localisation des stations de prélèvement de radionucléides solubles collectés lors de campagnes hauturières.

Tableau 1. Campagnes océanographiques réalisées ou exploitées entre 1986 et 2000.

Nom	Organisation	Début	Durée (j)	Lieu	Armement	Nb. prél. surf.	Nb. mes. γ	Nb. mes. ^3H
Pluteus 1986	LRC	15/06/86	9	Manche	CNRS CIRMAT	188	188	
Ferries 1986	LRC	21/06/86	3	Roscoff - Cork - Plymouth	Brittany Ferries	22	22	
Pluteus 1286	LRC	08/12/86	5	Nord Cherbourg	CNRS CIRMAT	47	47	
GEA 1986	Marine Nationale	04/05/86		Manche	GEA Cherbourg	100	100	
Aurélia 0387	Belgique	09/03/87	3	Sud mer du Nord	Belgique	41	40	
Aurélia 1187	Belgique	23/11/87	3	Sud mer du Nord	Belgique	6	6	
Sépia 0787	LRC	06/04/87	4	Sud mer du Nord	CNRS CIRMAT	14	14	
PLU 8 1987	LRC	19/08/87	20	Manche - sud mer du Nord	CNRS CIRMAT	165	165	
Luctor 0687	Belgique	22/06/87	4	Sud mer du Nord	Belgique	84	84	
GEA 1987	Marine Nationale	10/01/87		Manche - mers du Nord et d'Irlande	GEA Cherbourg	114	114	
Aurélia	LRC	15/04/88	1	Sud mer du Nord	Hollande	9	9	
Pluteus 0488	LRC	21/04/88	6	Manche	CNRS CIRMAT	50	61	
Pluteus 0688	LRC	01/06/88	6	Manche	CNRS CIRMAT	55	55	
TRA-MA-NOR I	LRC	05/07/88	23	Manche est, mer du Nord	Ifremer/Genavir	256	330	
Pluteus 0788	LRC	21/07/88	10	Manche	CNRS CIRMAT	106	106	
GEA 0788	Marine Nationale	04/07/88	23	Manche	GEA Cherbourg	105	105	
ARCTEMIZ	LMCE	10/08/88	1	Mer de Norvège	Ifremer/Genavir	6	6	
GEDY-NOR	LRC	31/05/89	13	Manche, mer du Nord	Ifremer/Genavir	128	170	
RDBR 0689	LRC	15/06/89	1	Rade de Brest	GEA Brest	23	23	
RDBR 0789	LRC	15/07/89	1	Rade de Brest	GEA Brest	23	23	
Pluteus 0989	LRC	05/09/89	14	Manche	CNRS CIRMAT	55	55	

Nom	Organisation mission	Début	Durée (j)	Lieu	Armement	Nb. pré. surf.	Nb. mes. γ	Nb. mes. ^3H
GEA 0989	Marine Nationale	05/09/89	14	Manche	GEA Cherbourg	87	87	
RDBR 0390	LRC	15/03/90	1	Rade de Brest	GEA Brest	47	47	
TRAMA-NOR II	LRC	21/09/90	16	Manche Est, mer du Nord	Ifremer/Genavir	205	240	
FXM 0990	LRC	22/09/90	2	Radiale Pas-de-Calais, Manche Est	CNRS CIRMAT	24	24	
CIR-0291	MAFF Lowes-toft	01/02/91	4	Sud mer du Nord, Manche Ouest	MAFF/R.U.	55	55	
TRAMA-NOR III	LRC	17/07/91	15	Manche Est, mer du Nord	Ifremer/Genavir	162	170	
CIR 0192	MAFF Lowes-toft	17/01/92	5	Sud mer du Nord, Manche Ouest	MAFF/R.U.	42	38	
GNB 0492	LRC	22/04/92	5	Golfe Normand - Breton	CNRS CIRMAT	51	51	
VALDIVIA	BSH Hambourg	25/08/93	9	Manche Est, mer du Nord	BSH Hambourg	59	63	
ARRHO	LRC	02/03/94	1	Embouchure du Rhône	CNRS CIRMED	8	8	
GEDY-MAC	LRC	29/08/94	15	Atlantique Nord-Est, Manche Ouest	Ifremer/Genavir	189	218	94
DY-MANCHE	LRC	18/11/94	13	Manche Ouest	CNRS CIRMAT	79	89	
Radiale Ch-Wh	LRC	01/02/95	1	Radiale Cherbourg - Wight	CNRS CIRMAT	8	16	
Radiale Ch-Wh	LRC	26/03/95	1	Radiale Cherbourg - Wight	CNRS CIRMAT	7	7	
Radiale Ch-Wh	LRC	04/05/95	1	Radiale Cherbourg - Wight	CNRS CIRMAT	8	16	
OMEX	SOC Southampton	01/06/95		Atlantique Nord-Est	R.U.	16	16	

Nom	Organisation mission	Début	Durée (j)	Lieu	Armement	Nb. pré. surf.	Nb. mes. γ	Nb. mes. ^3H
Radiale Ch-Wh	LRC	03/07/95	3	Radiale Cherbourg - Wight, Manche	CNRS CIRMAT	33	47	
Radiale Ch-Wh	LRC	05/09/95	1	Radiale Cherbourg - Wight	CNRS CIRMAT	10	20	
GNB 1195	LRC	29/11/95	4	Radiale Cherbourg - Wight, Golfe Normand - Breton	CNRS CIRMAT	47	37	
FERRIES	LRC	23/03/96	2	Roscoff - Cork	Brittany Ferries	24	24	24
Fond de Baie	LRC	09/04/96	2	Baie de la Fresnaye et entrée de la Rance	CNRS CIRMAT	15	15	14
FERRIES	LRC	27/06/96	1	Cherbourg - Poole	Brittany Ferries	8	8	
Fond de Baie	LRC	08/07/96	1	Baie de la Fresnaye et entrée de la Rance	CNRS CIRMAT	10	10	
IRMA	LRC	24/11/96	17	Manche Ouest	CNRS CIRMAT	83	88	75
AR-CANE	UBO - LPO	06/08/97	20	Golfe de Gascogne, ouest Portugal	Ifremer/Genavir	16	51	39
FERRIES	LRC	22/09/97	1	Roscoff - Plymouth	Brittany Ferries	11	11	11
FERRIES	LRC	30/09/97	1	Cherbourg - Poole	Brittany Ferries	8	11	8
FLUX-SED	LRC	14/03/98	9	Manche	CNRS CIRMAT	36	36	37
ATMARA	LRC	21/07/98	16	Atlantique Nord-Est, Manche Ouest	Ifremer/Genavir	141	196	93
CIROLANA 2000	MAFF Lowes-toft	02/03/00	29	Atlantique Nord-Est, Manche Ouest	MAFF/R.U.	79		35
Total	51		360			3165	3422	430

Les mesures de radionucléides dans l'eau de mer se sont déroulées en étroite collaboration avec les laboratoires européens concernés, que ce soit pour la mise en commun des moyens nautiques ou pour l'exploitation des résultats. Ces travaux ont donné lieu à plusieurs publications communes dont la figure 3 donne un exemple (Guéguéniat *et al.*, 1997a; Guéguéniat *et al.*, 1997b; Herrmann *et al.*, 1995; Hunt *et al.*, 2002 ; Povinec *et al.*, 2003).

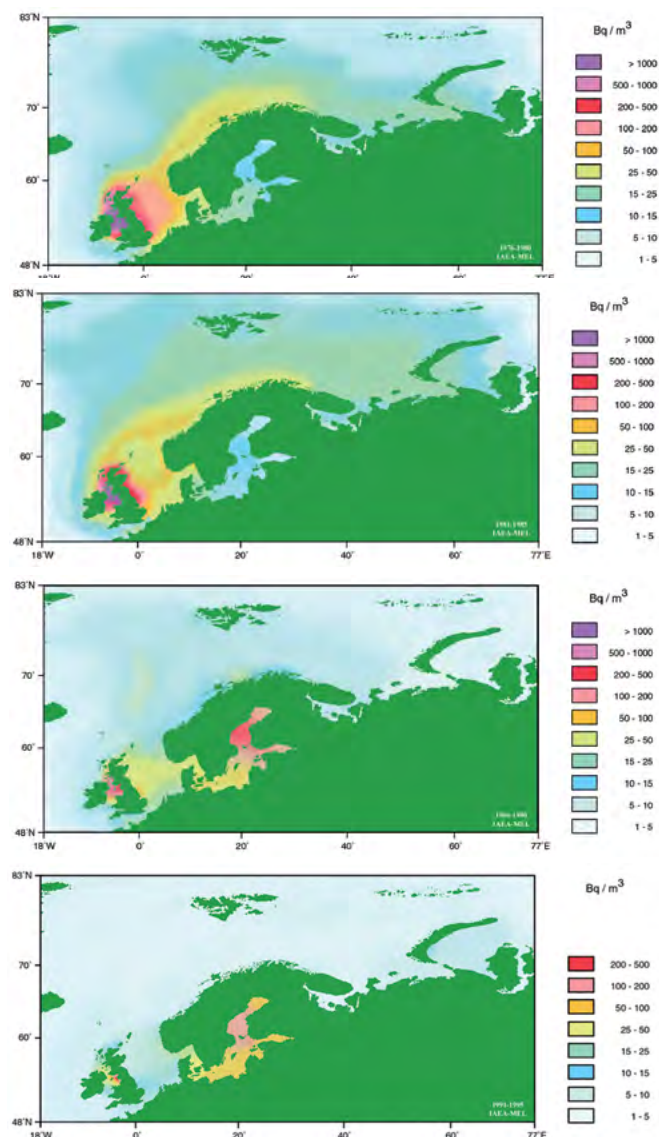


Figure 3. Évolution du ^{137}Cs dans les eaux de surface du nord de l'Europe (1976-1980), (1981-1985), (1986-1990), (1991-1995) (Povinec *et al.*, 2003).

2.2.1 Cartographie et exploitation quantitative des résultats

Les mesures ponctuelles de radionucléides dissous dans l'eau de mer ont mis en évidence des panaches marqués par les rejets industriels à l'échelle de la Manche et de la mer du Nord. L'exploitation des mesures ponctuelles pour établir des cartes synoptiques pose deux questions principales :

1. Est-ce que les mesures réalisées en surface sont représentatives de toute la colonne d'eau ?

Des réponses différentes peuvent être apportées en fonction des échelles de temps, d'espace et des régions concernées. Le domaine Manche Orientale - sud de la mer du Nord autorise des simplifications qui facilitent l'exploitation des mesures. Le régime mégatidal et les faibles profondeurs (moins de 50 mètres) entraînent un mélange vertical qui homogénéise rapidement les masses d'eau : à distance des émissaires, les mesures en surface sont représentatives de l'ensemble de la colonne d'eau sous-jacente.

2. Les mesures des radiotraceurs n'étant pas simultanées en tous points du domaine étudié, comment passer du référentiel terrestre au référentiel masse d'eau ?

Si le jeu de données pris en compte apparaît homogène vis-à-vis du signal représenté et qu'il existe suffisamment de mesures pour décrire la structure des panaches, il est possible *a priori* de réaliser des interpolations horizontales des concentrations ponctuelles mesurées en surface et d'établir des cartes de distribution des radionucléides artificiels. Il faut cependant tenir compte du déplacement des masses d'eaux associé à la marée qui peut intervenir entre chaque prélèvement. À titre d'exemple, des prélèvements effectués en Manche à quelques heures d'intervalle et à 30 km de distance, peuvent en fait correspondre à la même masse d'eau échantillonnée. Le besoin de quantification précise des stocks de radionucléides mesurés en mer a amené à repositionner les lieux de prélèvements effectués lors des campagnes océanographiques par rapport à ce référentiel « masse d'eau ». Un outil a été développé destiné à calculer à l'aide des données de courants de marée fournis par les modèles et pour chaque prélèvement x, y, t , la position qu'aurait eu ce prélèvement à une heure de marée de référence. Le positionnement des prélèvements les uns par rapport aux autres devient alors homogène par rapport à la masse d'eau et il devient possible de réaliser des interpolations horizontales des concentrations, puis de quantifier les quantités en tenant compte de la profondeur (Bailly du Bois and Guéguéniat, 1999 ; Bailly du Bois and Rancillac, 1998 ; Thorat, 1995).

Cette technique a permis d'interpoler les mesures ponctuelles et de réaliser des cartes pour chaque campagne. La stratégie de prélèvement a été guidée par cet objectif. Ces traitements ont permis d'appréhender de manière synthétique la répartition et l'évolution de la distribution des radionucléides en Manche, mer du Nord, mer d'Irlande et mer Celtique depuis 1986. Les résultats obtenus permettent la comparaison entre les différentes campagnes et facilitent l'exploitation quantitative des données acquises en prenant en compte la bathymétrie.

2.3 Circulation et mélanges des masses d'eaux en mer du Nord

Ce chapitre reprend les principaux résultats publiés dans (Bailly du Bois *et al.*, 1993), [annexe 10.2](#).

La campagne Tramanor I réalisée en juillet 1988 a réalisé une couverture complète de la mer du Nord à une époque où l'influence des retombées de l'accident de Tchernobyl de 1986 était encore clairement perceptible avec le ^{134}Cs (période de deux années). Les cartes réalisées montraient clairement l'influence de plusieurs termes sources distincts, avec pour chacun un signal spécifique.

Les études portant sur un seul traceur ne permettent *a priori* de distinguer que deux masses d'eaux différemment marquées. L'utilisation de plusieurs traceurs indépendants peut permettre théoriquement d'identifier autant de masses d'eaux que de traceurs. J'ai recherché des outils statistiques permettant de caractériser et quantifier ces différentes influences. Insatisfait de la représentativité des résultats obtenus, j'ai tenté une approche logico-mathématique simple en partant des hypothèses suivantes :

- les masses d'eaux entrant en mer du Nord (Atlantique, mer d'Irlande, Manche et Baltique) étaient suffisamment différenciées par les paramètres mesurés dans l'eau de mer (salinité, ^{125}Sb , ^{137}Cs , ^{134}Cs), pour que l'on tente de préciser en tout point de la mer du Nord leurs contributions respectives ;
- l'eau prélevée en chaque point de la mer du Nord est un mélange des quatre principales masses d'eaux entrantes ;
- un système de quatre équations linéaires, dont les quatre inconnues sont les contributions de chaque entrée, peut être résolu pour toutes les mailles de la grille d'interpolation ;
- les paramètres pris en compte pour caractériser les quatre masses d'eau sont supposés indépendants, constants dans le temps et homogènes dans le flux entrant. Hors, les apports de radioéléments varient de manière aléatoire,

par conséquent les valeurs indiquées pour identifier chaque entrée représentent des moyennes relatives au flux entrant et ne prennent pas en compte les variations spatio-temporelles ;

- les paramètres mesurés doivent être conservatifs à l'échelle de temps du système ;
- les apports de salinité et de radionucléides ne proviennent que des quatre origines prises en considération.

Du fait que seuls quatre paramètres ont été mesurés, il n'est théoriquement possible de caractériser que quatre entrées indépendantes, les apports provenant des fleuves et des retombées atmosphériques ne sont donc pas pris en compte dans ce schéma. Toutefois, sachant que la somme des contributions doit être égale à 100 %, il y a là un moyen supplémentaire de caractériser d'autres contributions.

Malgré ces restrictions et les erreurs de mesure qui peuvent atteindre 50 % pour les activités les plus faibles, un premier résultat remarquable est que la somme des contributions constatée sur l'ensemble de la mer du Nord se situe entre 87 et 113 % (figure 4). Le système paraît bien décrit par les hypothèses appliquées. De plus, les variations de cette somme autour de 100 % s'expliquent logiquement :

- les anomalies positives (101 à 110 %) proviennent d'une surreprésentation de la Baltique (figure 4) et sont associées aux apports de Tchernobyl (^{137}Cs et ^{134}Cs), non pris en compte par le calcul dans les eaux fluviales (Tamise, Seine, Rhin, Escaut, Elbe) et dans les eaux de pluie (marquage résiduel au centre de la mer du Nord et à l'ouest du chenal de Norvège).
- les anomalies négatives (87 à 99 %) sont associées essentiellement au panache de la Manche et résultent, soit de l'inhomogénéité du marquage de la Hague dans les eaux de la Manche au niveau du Pas-de-Calais, soit des apports d'eau douce en provenance des grands fleuves (Rhin, Escaut, Elbe).

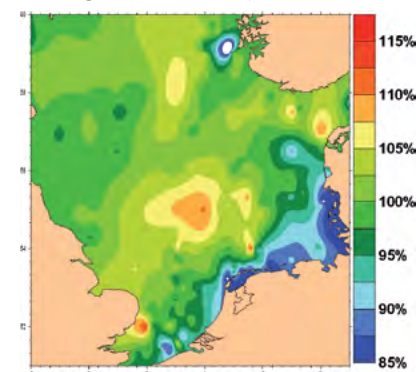


Figure 4. Somme des quatre contributions en eau de mer dans la mer du Nord (mer d'Irlande, Atlantique, Manche, Baltique).

Une « photographie » de la répartition de chacune des masses d'eaux en juillet 1988 a été obtenue (figure 5) ; elle précise le cheminement des masses d'eaux en mer du Nord.

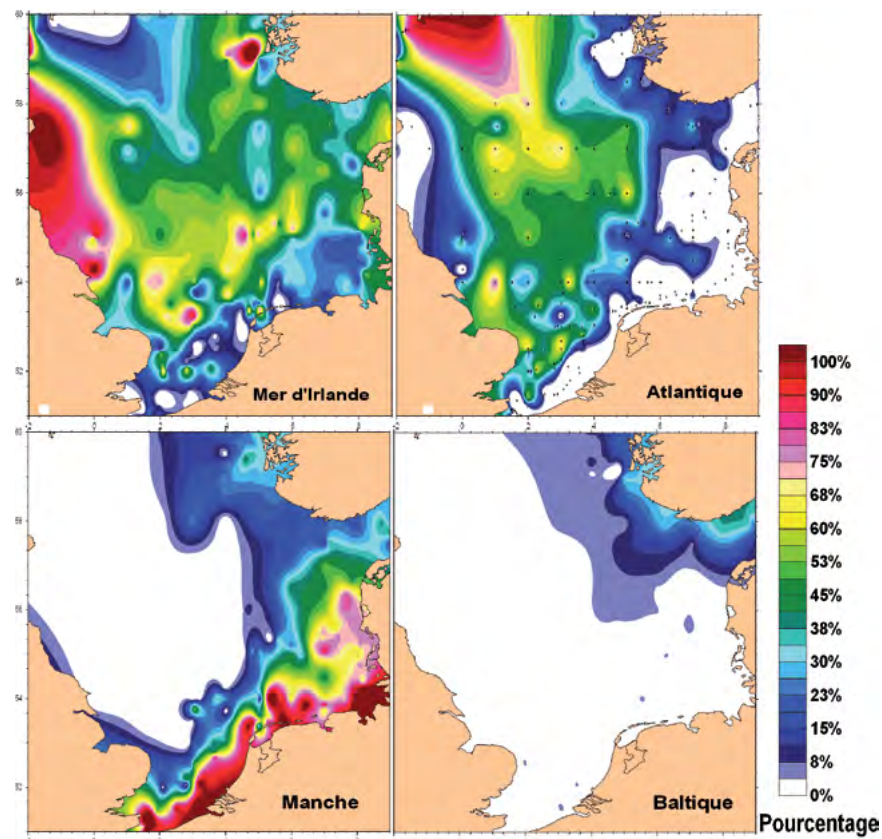


Figure 5. Origines des eaux présentes en mer du Nord en 1988 (exprimées en pourcentage du total).

Les eaux en provenance de l'Atlantique y pénètrent au niveau des Shetlands et descendent du nord vers le sud jusqu'au centre de la mer du Nord. Elles sont arrêtées dans leur progression par les eaux de la mer d'Irlande à l'ouest qui les contournent en s'y mélangeant peu à peu et par les eaux de la Manche au sud et à l'est. Les eaux atlantiques touchent très peu les régions littorales alors qu'elles constituent plus de la moitié des eaux de la mer du Nord. Les côtes est de l'Angleterre sont majoritairement concernées par les eaux de la mer d'Irlande, tandis que les côtes sud-est de la mer du Nord sont baignées presque uniquement par les eaux de la Manche (elles représentent plus de 80 % des eaux côtières dans le golfe de Hambourg). Le rejet d'un polluant dissous au centre de la Manche ne se dilue pratiquement pas entre le Pas-de-Calais et les côtes allemandes du golfe de Hambourg.

La fraction du ^{134}Cs provenant des retombées atmosphériques de l'accident de Tchernobyl qui a disparu entre 1986 et 1988 fournit une information sur les temps de résidence des eaux durant cette période (figure 6). Le renouvellement des eaux serait rapide et complet en deux ans pour toutes les zones périphériques de la mer du Nord et supérieur à 75 % pour l'ensemble de la mer du Nord (figure 7). Les eaux les plus anciennes sont localisées au centre, à la latitude 55° Nord, et se prolongent vers le nord entre le chenal de Norvège et l'entrée des eaux de l'Atlantique, le long du méridien 3° Est.

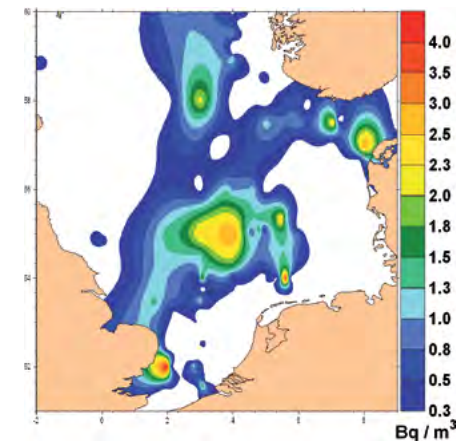


Figure 6. Reliquat des retombées de ^{134}Cs dues à l'accident de Tchernobyl.

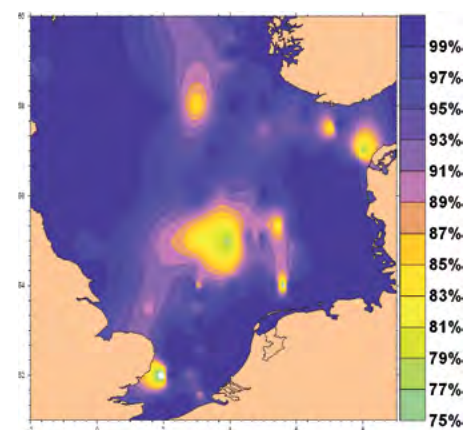


Figure 7. Taux de renouvellement des eaux de la mer du Nord en deux ans.

2.4 Durées de transit et flux des masses d'eau de la Manche vers la mer du Nord

Ce chapitre reprend les principaux résultats publiés dans (Bailly du Bois *et al.*, 1995b), annexe 10.3.

Les sept campagnes hauturières réalisées en mer du Nord de 1987 à 1991 ont permis de dresser des cartes générales de la distribution des radionucléides dissous ^{125}Sb , ^{137}Cs , ^{134}Cs et ^{99}Tc . Les quantités totales de radioactivité présentes dans le sud de la mer du Nord ont été cartographiées pour chaque campagne en prenant en compte la bathymétrie des zones concernées. Une méthode a été recherchée pour comparer les quantités de radionucléides rejetées par l'usine de La Hague avec les quantités mesurées en mer durant les six campagnes couvrant le sud de la mer du Nord de 1987 à 1991. Dans un premier temps, le sud de la mer du Nord a été découpé en une succession de boîtes, perpendiculaires à l'axe de l'écoulement des eaux de la Manche dans la mer du Nord, afin de calculer les quantités de radionucléides présentes dans chacune d'entre elles (figure 8). Les distributions brutes obtenues paraissent très variables (figure 9a). Après normalisation par rapport à la quantité rejetée durant l'année précédent chaque campagne (figure 9b) il est apparu que, en moyenne, les distributions de séries de campagnes ou de radionucléides différents étaient très similaires. Cette loi de distribution moyenne a été assimilée à une représentation des quantités d'eaux de la Manche présentes entre le Pas-de-Calais et le Skagerrak. Elle a permis d'associer de manière quantitative, aux stocks de radioactivité déduits des mesures en mer, les flux de radionucléides rejetés antérieurement par l'usine de La Hague. Une échelle temporelle a été couplée à l'échelle spatiale représentée par la succession des boîtes (figure 11).

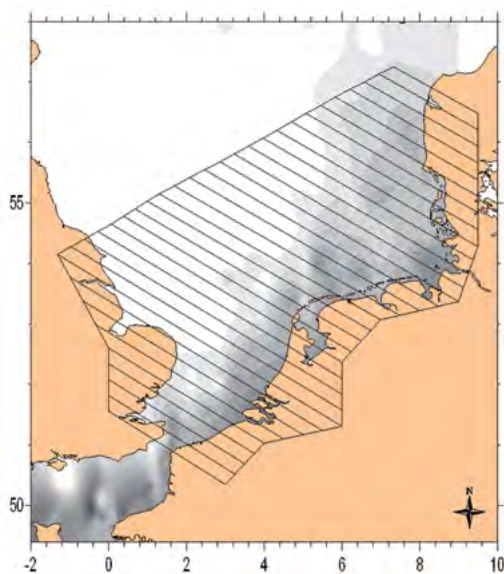


Figure 8. Découpage de la mer du Nord en boîtes perpendiculaires à la direction de l'écoulement des eaux de la Manche.

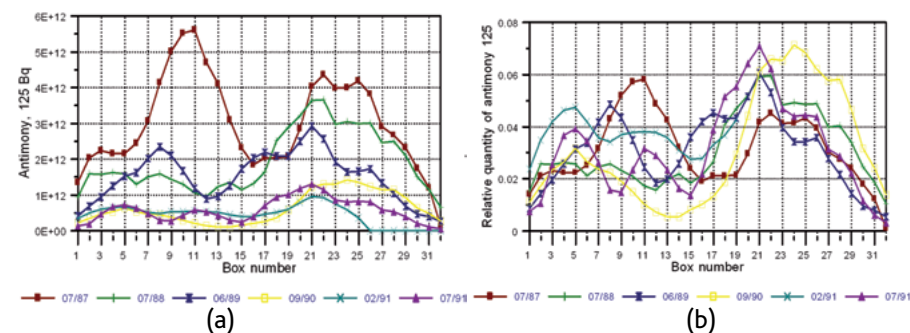


Figure 9. Distribution des quantités de ^{125}Sb mesurées dans le sud de la mer du Nord. a : quantités brutes ; b : quantités normalisées par rapport au rejet de l'année précédente.

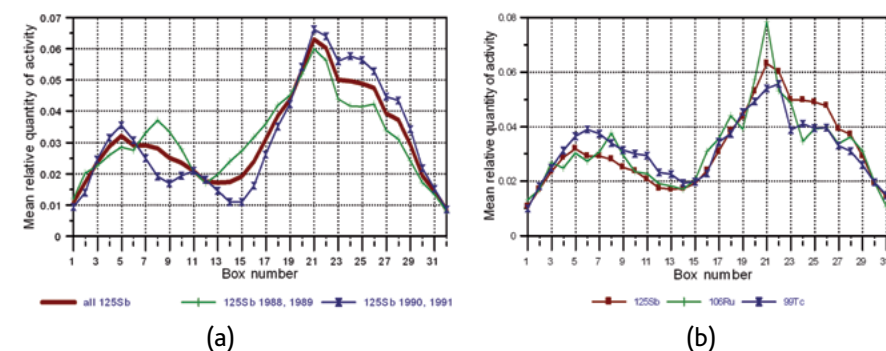


Figure 10. Distribution des quantités de radionucléides solubles mesurées dans le sud de la mer du Nord. a : ^{125}Sb , moyennes pour deux séries de campagnes différentes ; b : moyennes obtenues pour ^{125}Sb , ^{106}Ru et ^{99}Tc .

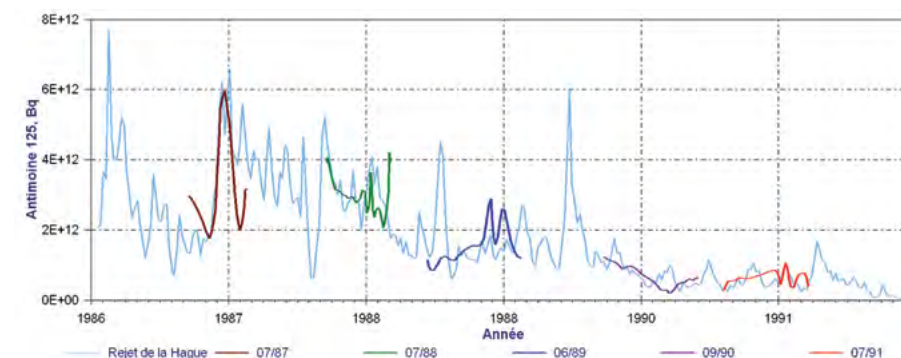


Figure 11. Comparaison des quantités de ^{125}Sb rejetées et mesurées en mer du Nord.

L'ajustement réalisé, validé par différents radionucléides, a mis en évidence les durées de transit des masses d'eau entre 1987 et 1992 : elles mettraient de 110 à 152 jours pour aller de La Hague au Pas-de-Calais et de 170 à 250 jours entre le Pas-de-Calais et le Skagerrak (tableau 2). Ces inventaires des stocks ont ouvert la voie aux comparaisons quantitatives avec les résultats de modélisation hydrodynamique obtenus indépendamment à l'Ifremer par Jean-Claude Salomon. Les distributions (figure 12) et les flux d'eau (figure 13) mesurés et simulés dans le Pas-de-Calais étaient très proches. Le caractère conservatif du ^{125}Sb et du ^{99}Tc en solution dans l'eau de mer a été confirmé de cette manière. Par comparaison, il a été possible d'estimer le stock de ^{106}Ru subsistant en solution à la sortie de la Manche, soit 30 % des quantités rejetées.

Tableau 2. Temps de transit moyens des eaux en Manche et mer du Nord (jours).

Date de la campagne	Juillet 1987	Juillet 1988	Juin 1989	Septembre 1990	Février 1991	Juillet 1991	Janvier 1992
La Hague → Pas-de-Calais	152	132	110	120	130	120	140
Pas-de-Calais → Skagerrak	200	170	250	250	240	230	220
La Hague → Skagerrak	352	302	360	370	370	350	360

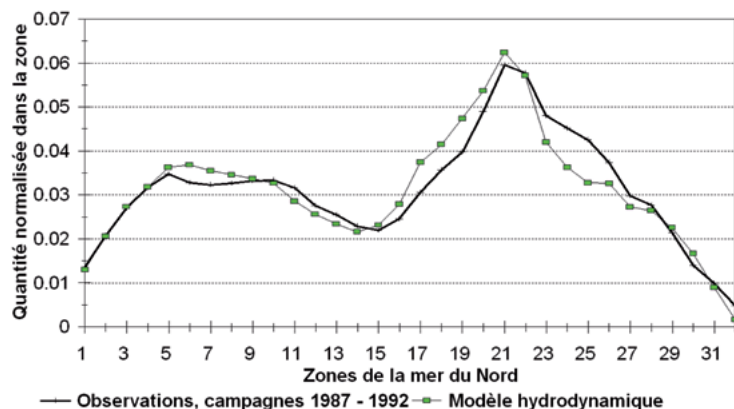


Figure 12. Répartition de l'antimoine 125 dans le sud de la mer du Nord, comparaison modèle/mesures.

La durée totale du transit entre le cap de La Hague et le Skagerrak serait de 300 à 370 jours. Le flux des eaux de la Manche vers la mer du Nord dans le Pas-de-Calais a été évalué, de 70 000 à 200 000 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de janvier à juillet 1988 (figure 13).

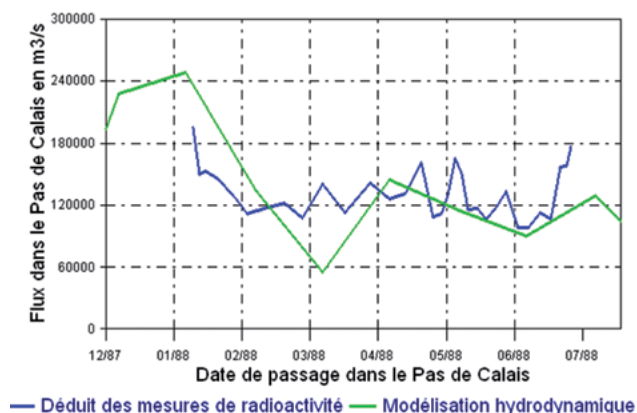


Figure 13. Flux d'eau dans le Pas-de-Calais déduit des quantités mesurées en 1988, et simulé.

2.5 Dispersion moyenne et bilan des radionucléides dissous en Manche

Ce chapitre reprend les principaux résultats publiés dans (Bailly du Bois and Guéguéniat, 1999), [annexe 10.4](#).

La normalisation des concentrations mesurées par rapport au rejet connu issu de l'usine de La Hague a été appliquée aux résultats des campagnes réalisées en Manche en 1983, 1986, 1988 et 1994. Cet émissaire y est largement prépondérant vis-à-vis des autres sources (rejets des centrales nucléaires côtières et bruit de fond des eaux entrant en Manche). Ces traitements ont mis en évidence l'impact moyen de l'usine de La Hague à l'échelle de la Manche pour des éléments solubles comme l'antimoine 125 ou le tritium (figures 14a et b). La dispersion des rejets de l'usine de La Hague se fait globalement d'ouest en est, avec un gradient décroissant des côtes françaises vers les côtes anglaises, ces dernières n'étant que faiblement touchées par le panache de La Hague. L'extension vers l'ouest du marquage le long des côtes françaises se limite généralement au golfe normand-breton.

La comparaison de l'impact moyen de ce traceur avec d'autres radionucléides moins solubles (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{106}Ru , ^{60}Co) détermine la quantité de ces radionucléides ayant quitté l'eau de mer pour se fixer sur les sédiments ou les espèces vivantes, ainsi que les régions principalement concernées par ces pertes (figure 14, tableau 3). Ces résultats donnent des contraintes globales pour les études concernant la fixation de ces radionucléides sur les sédiments.

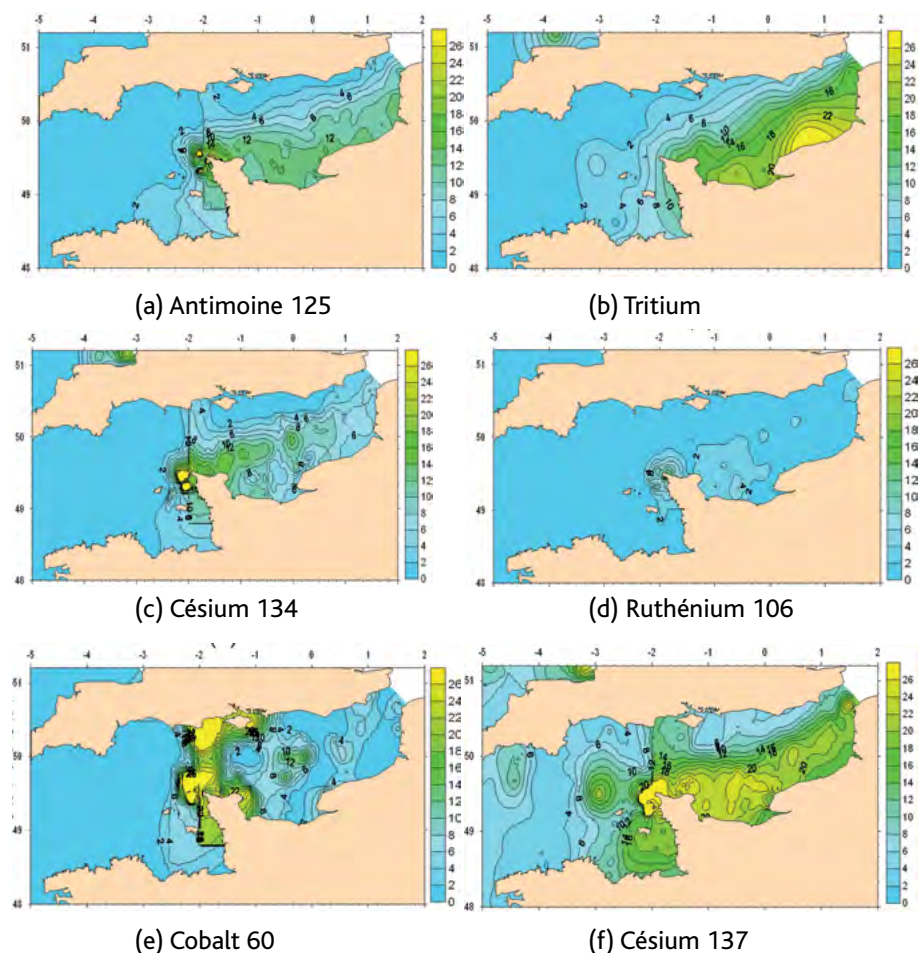


Figure 14. Activité volumique moyenne ($Bq.m^{-3}$) associée à un rejet constant de l'usine de La Hague $10^6 Bq.s^{-1}$ (déduit des campagnes de mesure en mer réalisées en 1983, 1986, 1988 et 1994).

Ces calculs montrent que, à l'échelle de la Manche, 74 % du ^{106}Ru et 86 % du ^{60}Co ont quitté l'eau de mer pour se fixer sur les sédiments ou les espèces vivantes (figure 14d et e). Cette proportion se réduit à 14 % pour le ^{134}Cs (figure 14c), principalement dans les zones côtières. Ces résultats confirment l'affinité respective de ces éléments pour les particules sédimentaires, qui se traduit classiquement par leurs différents K_d . Les ruthénium et cobalts (K_d respectifs de 5 000 et 40 000) sont présents essentiellement dans la partie centrale de la Manche et diminuent fortement lors du déplacement des eaux vers l'est. Les formes complexes de ^{106}Ru et ^{60}Co dans les rejets industriels, puis en solution dans l'eau de mer, doivent être prises

en compte pour comprendre ces résultats (Gandon *et al.*, 1994 ; Gaudaire, 1999). Le ^{134}Cs ($K_d = 1\ 000$) montre un déficit le long des côtes, que l'on peut associer à une charge en matières en suspension plus importante et des temps de résidence plus longs. Ces résultats globaux intègrent les processus biogéochimiques et le transport sédimentaire qui déterminent le devenir des radionucléides en solution.

L'impact moyen constaté pour le ^{137}Cs (figure 14f) était anormalement élevé comparativement aux radionucléides conservatifs (^{125}Sb et 3H). On en a trouvé en moyenne 2,3 fois plus que les quantités rejetées et le marquage observé s'étendait à l'ouest du Cotentin vers l'Atlantique, dans des zones qui ne sont pas concernées par le marquage de l'usine de la Hague. Les sources connues ayant été déduites (bruit de fond des retombées atmosphériques), il a fallu envisager une autre source de ^{137}Cs pour expliquer ces résultats.

Tableau 3. Comparaison des quantités de radionucléides mesurées en Manche avec les rejets correspondants issus d'AREVA-NC de 1983 à 1994.

Durée de rejet équivalente : 32 semaines - 7,3 mois	^{137}Cs	^{134}Cs	^{106}Ru	^{125}Sb	^{60}Co	3H
Fraction des rejets d'AREVA-NC	233 %	86 %	26 %	98 %	14 %	103 %

2.6 Circulation des masses d'eaux entre la mer d'Irlande et la Manche

Ce chapitre reprend les principaux résultats publiés dans (Bailly du Bois *et al.*, 2002), annexe 10.5.

L'hypothèse d'un marquage en provenance de la mer d'Irlande où ont été effectués les rejets de l'usine de Sellafield, cent fois plus élevés que ceux de La Hague, a été envisagée pour expliquer l'excès de ^{137}Cs mesuré en Manche. Ce marquage pouvait s'expliquer si une fraction des eaux de la mer d'Irlande traversait le chenal St George pour transiter en mer Celtique et parvenir à l'ouest de la Manche. Cette hypothèse contredisait l'idée généralement admise que le flux moyen des eaux de la mer d'Irlande se faisait du sud vers le nord. Des premiers résultats de simulation hydrodynamique allaient dans le sens de cette hypothèse (Garreau and Bailly du Bois, 1997). Les campagnes de mesure organisées de 1994 à 2000 l'ont confirmée (figures 15 et 16) ; il a été possible de préciser la circulation des eaux, d'estimer les temps de résidence et les flux des masses d'eaux en mer Celtique (figure 17).

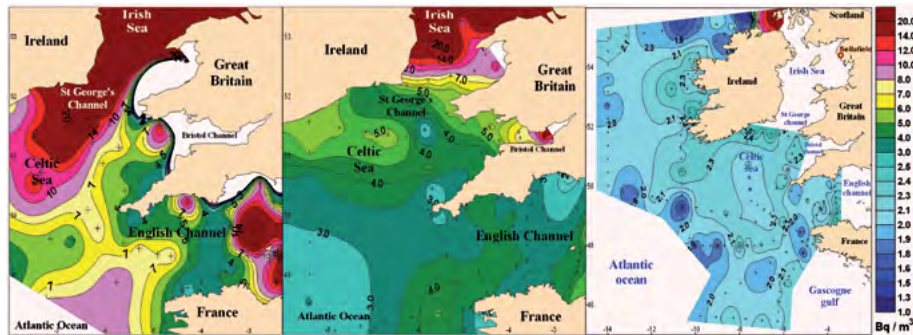


Figure 15. ^{137}Cs dans l'eau de mer en 1983, 1994 et 1998.

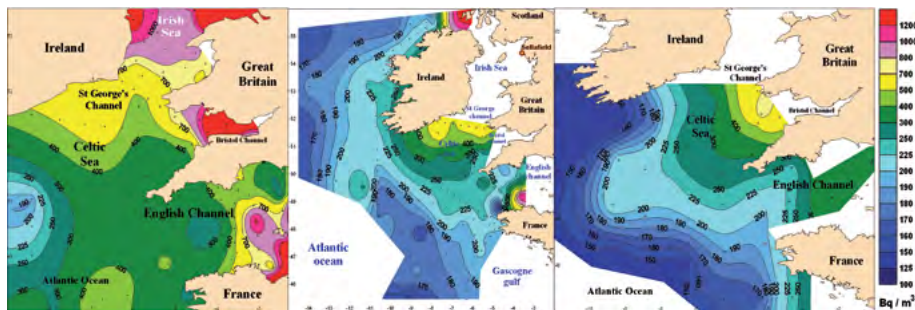


Figure 16. Tritium dans l'eau de mer en 1994, 1998 et 2000.



Figure 17. Circulation et temps de résidence des masses d'eaux sur le plateau continental du nord-ouest de l'Europe.

CHAPITRE 3

Validation de modèles hydrodynamiques par les radiotraceurs solubles

J'ai débuté les comparaisons modèle/mesures en 1994 par des comparaisons quantitatives pour tester la conservativité des traceurs utilisés (figure 12, [Bailly du Bois *et al.*, 1995b]). Les méthodes mises en œuvre pour connaître la dispersion des radionucléides en mer ont fourni des résultats quantitatifs directement comparables à ceux issus des modèles hydrodynamiques de dispersion. À partir de 1998, mes travaux se sont focalisés sur la prise en main et l'adaptation des modèles hydrodynamiques aux besoins de l'IRSN en collaboration avec les équipes de modélisation côtière de l'Ifremer, en particulier Franck Dumas. L'exploitation des mesures de radionucléides dissous dans le but de valider des modèles est devenue systématique et l'ensemble des données issues des mesures de radiotraceurs a été exploité pour cette validation. Les stratégies d'acquisition des mesures ont été adaptées de manière à faciliter les comparaisons modèle/mesures et cibler les domaines les plus difficiles à simuler.

Ce travail de validation s'est décliné depuis l'échelle générale de la Manche et de la mer du Nord, pour se raffiner en se rapprochant du principal émissaire de radionucléides artificiels en Manche : l'usine de retraitement de combustibles nucléaires d'AREVA-NC à La Hague. Les caractéristiques de cet émissaire en font un outil de choix pour la validation de modèles : les flux rejetés sont connus avec précision lors de leur émission ; les radionucléides rejetés permettent des mesures à haute fréquence à toutes les échelles d'espace et de temps ; le lieu d'introduction des rejets, le raz Blanchard, est l'une des régions du monde les plus dynamiques et délicates à modéliser : les modèles testés dans cette zone peuvent être considérés comme robustes.

Plusieurs programmes de recherche ont été accomplis, en abordant des thématiques de plus en plus contraignantes pour les modèles en deux, puis en trois dimensions. Ils ont permis de couvrir les principales échelles de temps et d'espace concernées par l'océanographie côtière, depuis la minute et l'environnement proche d'un émissaire, jusqu'à l'année et l'ensemble du plateau continental du nord-ouest de l'Europe (années, mois, jours ; 1 000 km, 10 km, 100 m).

La collaboration entre l'IRSN/LRC et l'Ifremer s'est d'abord déroulée dans le cadre des travaux du Groupe de recherche (GDR) Manche, puis de trois programmes Européens, les programmes MAST « FLUXMANCHE I » et « FLUXMANCHE II », « Quantification des flux de matière transitant en Manche » (1990-1997) ; le programme MAST « Utilisation des marqueurs radioactifs pour la validation des modèles numériques hydrodynamiques en mer du Nord » (1991-1993) ; le programme Interreg II « Hydrologie de l'Atlantique et radiotraceurs, mise en réseau et modélisation » (2000-2001), (Ryan *et al.*, 2001a, b, c). Elle se poursuit dans le cadre du protocole de collaboration établi entre l'IRSN et l'Ifremer.

Cette collaboration s'est traduite par de nombreuses publications communes (Bailly du Bois *et al.*, 2012b ; Bailly du Bois and Dumas, 2002, 2003, 2004b, a, c, 2005a, b, 2007, 2010a, b, c ; Bailly du Bois *et al.*, 2005 ; Bailly du Bois *et al.*, 2010c, b, 2012c ; Bailly du Bois *et al.*, *Accepted* ; Bailly du Bois *et al.*, 2012f ; Bailly du Bois *et al.*, 1997 ; Bailly du Bois *et al.*, 1995b ; Blanpain *et al.*, 2007 ; Blanpain *et al.*, 2009 ; Dumas *et al.*, 2011 ; Garreau and Bailly du Bois, 1997 ; Guéguéniat *et al.*, 1994 ; Guéguéniat *et al.*, 1995b ; Guéguéniat *et al.*, 1995c ; Laguionie *et al.*, 2012a ; Laguionie *et al.*, 2012b ; Salomon *et al.*, 1997). Cette validation a été à la fois qualitative (comparaison des marquages mesurés avec ceux simulés à un moment donné), quantitative (comparaison des quantités observées avec les quantités mesurées), et temporelle (comparaison de l'évolution des marquages en fonction de celle des quantités rejetées).

3.1 Dispersion en Manche et dans le sud de la mer du Nord

Ce chapitre reprend les principaux résultats publiés dans (Bailly du Bois and Dumas, 2005a), [annexe 10.6](#).

À l'échelle de la Manche et de la mer du Nord, les marquages observés résultent généralement de rejets ayant été effectués des mois, voire des années auparavant. La confrontation modèle/mesure implique de disposer de modèles applicables à ces échelles. Le mélange horizontal et vertical des masses d'eaux permet de calculer les quantités de radionucléides présents à partir des mesures effectuées en surface. Ces stocks peuvent alors être comparés avec les résultats issus de simulations de modèles hydrodynamiques. Différents modèles ont été testés de cette manière, comme le modèle Télémaque (Janin and Annebicque, 1997), ou le modèle du Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH - Shonfeld, 1995). L'essentiel des travaux de comparaison ont été réalisés avec le modèle de courants résiduels de marée mis au point par Orbi et Salomon à l'Ifremer (Orbi and Salomon, 1988). Ce type de modèle présente plusieurs avantages pour les comparaisons à l'échelle de la Manche et de la mer du Nord. La méthode employée, l'utilisation de courants résiduels de marée en coordonnées barycentriques, permet de simuler rapidement et avec une bonne précision la dispersion à grande échelle. Les comparaisons réalisées à partir de 1988 ont démontré que ce type de modélisation était, à l'époque, le mieux à même de reproduire les structures de dispersion observées (Guéguéniat *et al.*, 1994 ; Guéguéniat *et al.*, 1993b ; Salomon *et al.*, 1991 ; Salomon *et al.*, 1988).

Les comparaisons modèle/mesures donnaient des résultats cohérents en situation moyenne en ajustant le forçage météorologique de manière à faire correspondre les concentrations mesurées ([figure 18](#)) et simulées ([figure 19](#) [Bailly du Bois and Guéguéniat, 1999]).

Il est apparu que lors de la simulation de campagnes individuelles prenant en compte la marée et les vents réels, des écarts significatifs étaient constatés concernant les quantités et le flux moyen des masses d'eaux, respectivement sur- et sous-estimés par les modèles ([figure 20](#)). Les modèles calculaient des concentrations en moyenne deux fois plus élevées que celles mesurées. Un modèle de courant résiduels a été construit à l'Ifremer (Dumas, 1998) afin de représenter au mieux la dispersion en Manche et dans le sud de la mer du Nord (modèle AMANDA - Atlantique - Manche - Danemark, [figure 21](#)). Une étude paramétrique a ensuite tenté de faire correspondre les distributions mesurées et simulées.

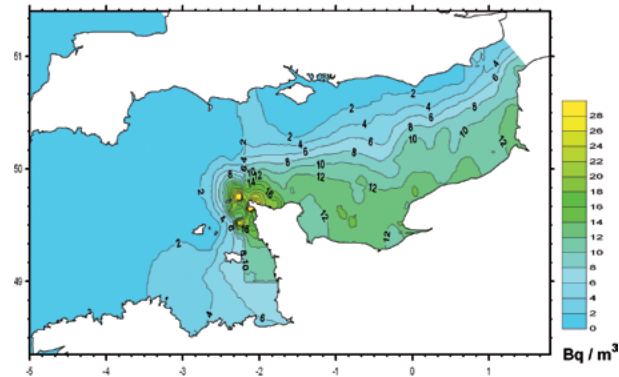


Figure 18. Impact moyen de l'usine de retraitement de la Hague en Manche pour un rejet constant d'antimoine 125 de $1 \text{ MBq}\cdot\text{s}^{-1}$ (déduit des campagnes de mesure réalisées en 1983, 1986, 1988 et 1994).

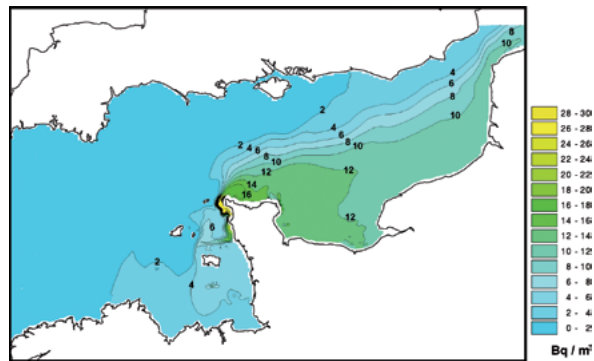


Figure 19. Simulation numérique d'un rejet constant de $10^6 \text{ Bq}\cdot\text{s}^{-1}$ avec un vent constant de sud-ouest de $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

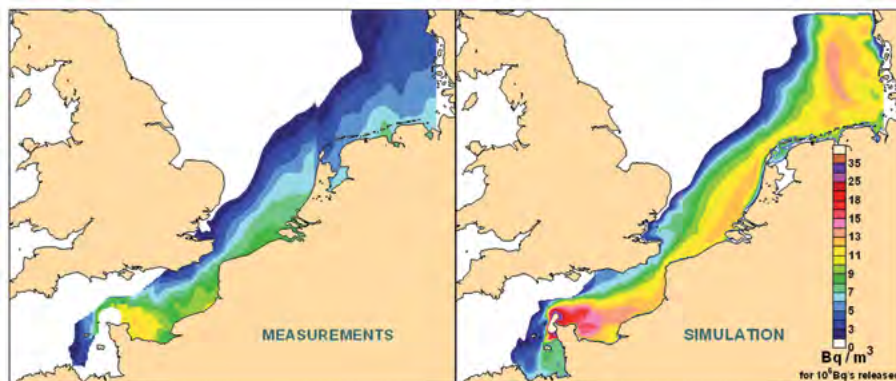


Figure 20. Simulation de l'impact moyen de l'usine de La Hague en Manche et en mer du Nord pour un rejet constant d'antimoine 125 de $10^6 \text{ Bq}\cdot\text{s}^{-1}$, sans calibration du modèle (moyenne normalisée des concentrations simulées et mesurées durant six campagnes de mesures).

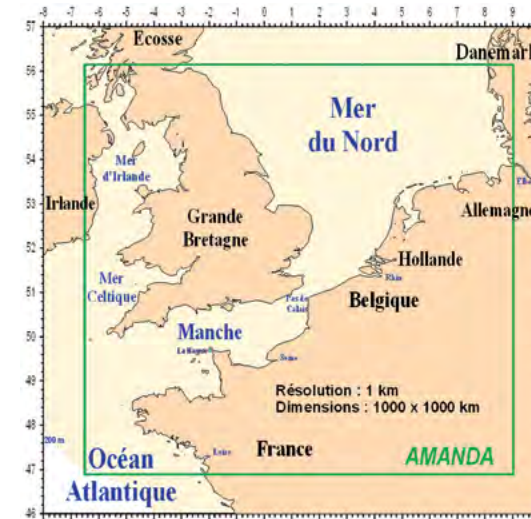


Figure 21. Emprise du modèle de courants résiduels AMANDA.

3.1.1 Paramètres du modèle

À l'échelle de la Manche et de la mer du Nord et avec ce type de modèle, peu de paramètres peuvent être modifiés pour permettre l'ajustement entre les mesures et les résultats de modélisation : il s'agit essentiellement du coefficient de diffusion, des données de vent prises en compte et du mode de calcul de la force de frottement du vent sur la mer. Les calibrations en situation moyenne réalisées initialement par Jean-Claude Salomon établissaient un vent moyen de sud-ouest de $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Il assimilait alors cet ajustement à une « pente » entre l'Atlantique et la mer du Nord qui n'était pas décrite par les conditions aux limites appliquées. Des tests ont été réalisés avec le modèle AMANDA pour préciser ce forçage, de manière à reproduire au mieux la dispersion des radionucléides dissous en Manche et dans le sud de la mer du Nord. De nombreuses combinaisons de vents et de coefficients de diffusion ont été testées, ainsi que les différents jeux de données météorologiques disponibles ou formules représentant le frottement du vent sur la mer. Au total, plus de 1 000 simulations durant chacune sept années ont été réalisées.

3.1.2 Critères de comparaison

Plusieurs critères peuvent être pris en compte pour comparer les résultats de calcul et les mesures *in situ*. Comme les traitements réalisés à partir des mesures individuelles obtenues durant les différentes campagnes permettaient de calculer les stocks de radionucléides présents, ces stocks intégrés ont semblé particulièrement robustes

pour réaliser les comparaisons. Un accord entre les quantités simulées et mesurées signifie que, en moyenne, les flux simulés sont réalistes. Dans un deuxième temps les distributions spatiales des radionucléides mesurés lors de chaque campagne ont été comparées.

Il ressort de ces comparaisons que la dynamique de la dispersion est dépendante du forçage du vent. Les différentes données de vent disponibles ont été comparées et testées (observations de sémaphores, modèles météorologiques). Si les données issues de modèles météorologiques ne reproduisent pas la variabilité réelle des vents et entraînent par construction une diminution du forçage moyen induit sur la mer, après ajustement ils représentent mieux la répartition spatiale des panaches mesurés. De plus, ils sont plus adaptés pour contraindre les modèles hydrodynamiques car ils permettent une homogénéisation du forçage dans l'espace et dans le temps qui n'est pas assurée par les observations. À titre d'exemple, la prise en compte de données de mesure de deux sémaphores distants de 5 km, sur le site de l'usine de La Hague et au sémaphore de la Hague, entraîne un doublement du flux moyen dans le Pas-de-Calais.

Aucune des formulations du coefficient de frottement du vent sur la mer existant dans la littérature ne permettant de reproduire la dispersion des radionucléides, une nouvelle formulation a été proposée en modifiant la paramétrisation du frottement C_d . Le meilleur accord a été obtenu avec une formulation du type $C_d = 0,0015 \times \|\vec{W}\|^p$, $\|\vec{W}\|$ représentant le module du vecteur vent à 10 mètres, et avec une valeur de p de 0,48. Ce paramètre appliqué à l'ensemble des campagnes de mesures donne un coefficient de corrélation entre les concentrations mesurées et calculées de 0,88 ; l'erreur moyenne observée sur des concentrations ponctuelles dans l'eau de mer est de $\pm 54\%$; l'écart moyen entre les quantités de radionucléides calculées et mesurées en Manche et dans le sud de la mer du Nord est inférieur à 1%.

La figure 22 montre la dispersion de l'antimoine 125 mesurée et simulée pour les six campagnes exploitées lors de la calibration, ainsi que la dispersion moyenne simulée et mesurée.

La représentativité du modèle a été testée pour des campagnes (figure 23) ou des radionucléides (figure 24) qui n'ont pas été utilisés pour la calibration. L'accord obtenu confirme la robustesse du modèle pour cette zone et la période 1986-1994. La simulation de radionucléides non conservatifs, ayant une plus grande affinité pour les particules sédimentaires ou les espèces vivantes, a permis de quantifier ce comportement, dans l'espace et dans le temps pour ^{106}Ru , ^{137}Cs et ^{60}Co .

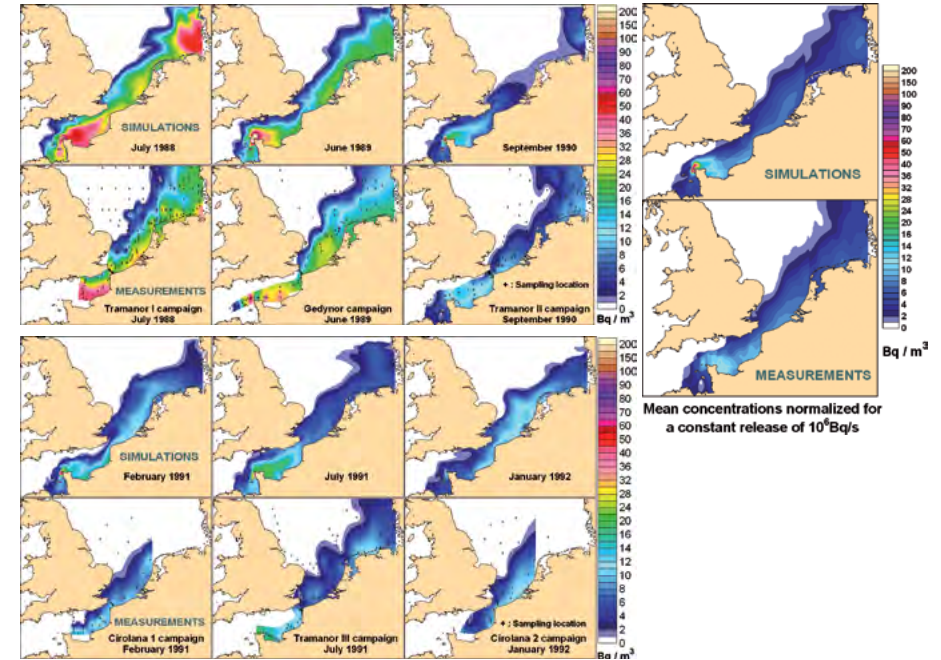


Figure 22. Comparaison modèle/mesures des concentrations de ^{125}Sb pour les six campagnes océanographiques utilisées pour la validation.

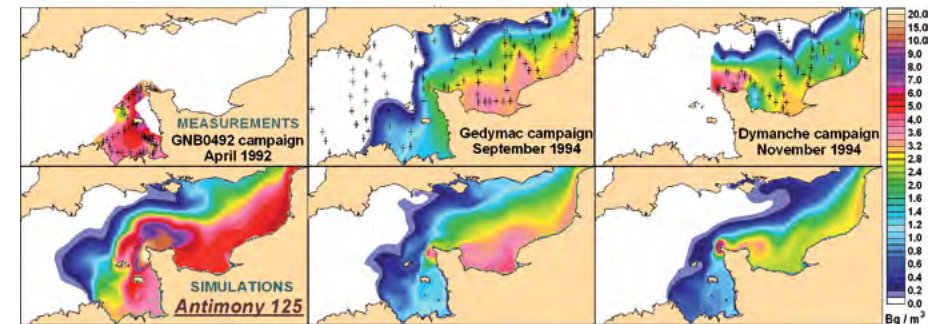


Figure 23. Comparaison modèle/mesures pour des campagnes océanographiques non utilisées pour la validation du modèle, ^{125}Sb en 1992 et 1994.

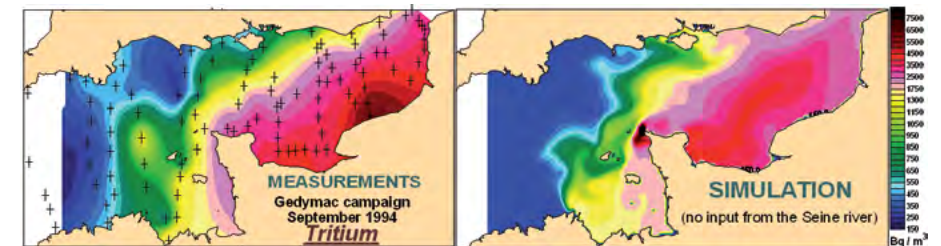


Figure 24. Comparaison modèle/mesures pour des campagnes océanographiques non utilisées pour la validation du modèle, tritium en 1994.

Le modèle utilisé peut être appliqué *a priori* pour n'importe quelle date lorsque les données météorologiques sont disponibles. Il faut néanmoins tenir compte de l'évolution des modèles météorologiques qui peut induire une évolution du coefficient de frottement du vent sur la mer à prendre en compte.

Le principal paramètre d'ajustement est le forçage du vent sur la surface de la mer ; il contribue pour les deux tiers au flux moyen des eaux de la Manche vers la mer du Nord avec une possibilité d'inversion temporaire de ce flux lors de périodes de vent de secteurs nord à est. Il faudrait rechercher d'autres méthodes pour confirmer la représentativité du forçage appliqué, et comprendre les mécanismes expliquant ce forçage à grande échelle. La paramétrisation retenue représente une question ouverte, ravivée par les résultats obtenus dans la zone de Fukushima : les écarts entre les quantités simulées et mesurées nécessitent un forçage du vent encore plus important pour faire correspondre les mesures aux simulations. L'origine des données météorologiques utilisées est également un paramètre critique à prendre en compte.

Ces travaux ont démontré l'intérêt des bilans quantitatifs réalisés avec les radiotraceurs qui sont les seuls à permettre des comparaisons modèles/mesures aux grandes échelles de temps et d'espace (plus d'un mois et plus de 100 km).

3.2 Champ proche d'un émissaire, 2D (programme Dispro)

Ce chapitre reprend les principaux résultats publiés dans (Bailly du Bois *et al.*, 2012c), [annexe 10.7](#).

Autres références concernant ce chapitre : Bailly du Bois, 2004a, 2005a, 2006, 2011 ; Bailly du Bois and Dumas, 2004b, a, 2005a, 2007, 2010b, c ; Bailly du Bois *et al.*, 2005 ; Bailly du Bois *et al.*, 2012c.

Dans une mer mégatidale comme la Manche, il peut être plus difficile de caractériser la dispersion de traceurs solubles dans le champ proche d'un émissaire (moins de 30 km), qu'à plus grande échelle (50-500 km). La proximité d'un émissaire impose de représenter la dispersion de panaches individuels durant les heures suivant les rejets, alors qu'à plus grande distance ces panaches se sont mélangés entre eux et homogénéisés. De plus, la comparaison de concentrations ponctuelles mesurées et simulées est plus pénalisante avec des concentrations qui varient rapidement dans le temps et dans l'espace. D'autre part, la dynamique de la dispersion près d'un émissaire est trop rapide pour permettre des mesures synoptiques montrant

la répartition d'un panache à un moment donné. L'estimation des quantités de radionucléides présentes à un instant donné n'est plus possible à partir des mesures *in situ*. Compte tenu de ces contraintes, un traceur et des techniques d'échantillonnage adaptées ont été recherchés. Un échantillonnage assisté par la simulation a été mis en place ainsi que des critères de comparaison adaptés à la structure des panaches observés (position, paramètres de dilution en fonction du temps et de la distance).

3.2.1 Mesure du radiotraceur

Le tritium présent dans les rejets liquides contrôlés de l'usine d'AREVA-NC à La Hague est un outil pertinent pour l'étude de la dispersion à courte distance et la validation de modèles hydrodynamiques :

- les rejets de l'usine de COGEMA La Hague constituent la principale origine du tritium en Manche. Ils induisent des concentrations à Goury (5 km de l'émissaire) en moyenne de l'ordre de 12 Bq.L⁻¹, 30 fois plus élevées que celles des eaux atlantiques entrant en Manche par l'ouest (0,2 à 0,3 Bq.L⁻¹) ;
- les rejets des centrales nucléaires côtières (Flamanville, Paluel, Penly, Gravelines, Dungeness) sont environ 100 fois plus faibles que ceux de l'usine AREVA-NC ; du fait de la dérive moyenne vers l'est, les eaux de la Seine (3 à 9 Bq.L⁻¹) n'influencent pas la région du cap de La Hague ;
- le tritium rejeté par l'installation de La Hague est strictement conservatif dans l'eau de mer sous la forme HTO ;
- le tritium HTO est simple à échantillonner (remplissage de flacons de 50 mL) et à mesurer (mesure par scintillation liquide). Il est possible d'acquérir un grand nombre de mesures pour un coût raisonnable.

Le panache issu de l'émissaire de rejets liquides d'AREVA-NC est identifiable en surface à partir de 500 m du point de rejet ; il représente une zone large d'environ 300 m à partir de 1 km de l'émissaire. Compte tenu de la vitesse du navire, des prélèvements toutes les trente secondes ont été réalisés systématiquement pour échantillonner le panache avec une précision suffisante.

Sept campagnes océanographiques de cinq à 10 jours ont été réalisées à bord du navire « Côtes de la Manche », en septembre et novembre 2001 (Dispro 08, Dispro 09 et Dispro 10), juin et juillet 2002 (Dispro 11 et Dispro 12), juin 2004 (Dispro 04) et avril 2005 (Dispro 05). Ces campagnes totalisent 39 jours de mer durant lesquels 14 451 échantillons ont été collectés. La [figure 25](#) présente la répartition des échantillons collectés dans la région du cap de La Hague.

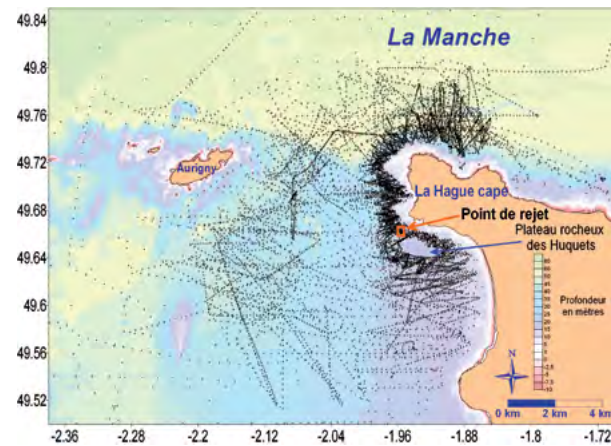


Figure 25. Localisation des prélèvements effectués lors des campagnes Dispro dans la région du cap de La Hague.

3.2.2 Mesures physiques

En complément des mesures de radiotraceurs solubles, qui intègrent les processus d'advection et dispersion, des mesures physiques ont été acquises pour contraindre le modèle. Des profils de courant ont été acquis en plusieurs stations réparties autour du cap de La Hague durant des périodes de 12 h à 48 h à l'aide d'un courantomètre Doppler déposé au fond. Des mesures marégraphiques ont été obtenues en trois points situés de part et d'autre du cap de La Hague.

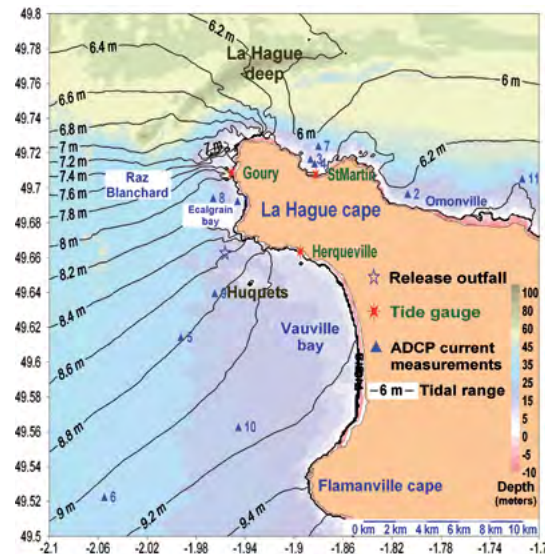


Figure 26. Amplitude de la marée et localisation des stations de mesures de courant et de hauteur d'eau autour du cap de La Hague.

3.2.3 Modèle hydrodynamique

Le modèle hydrodynamique est une déclinaison du modèle MARS (Lazure and Dumas, 2008). Il est constitué de quatre modèles imbriqués (figure 27). Les principales caractéristiques de ces modèles sont présentées dans le tableau 4.

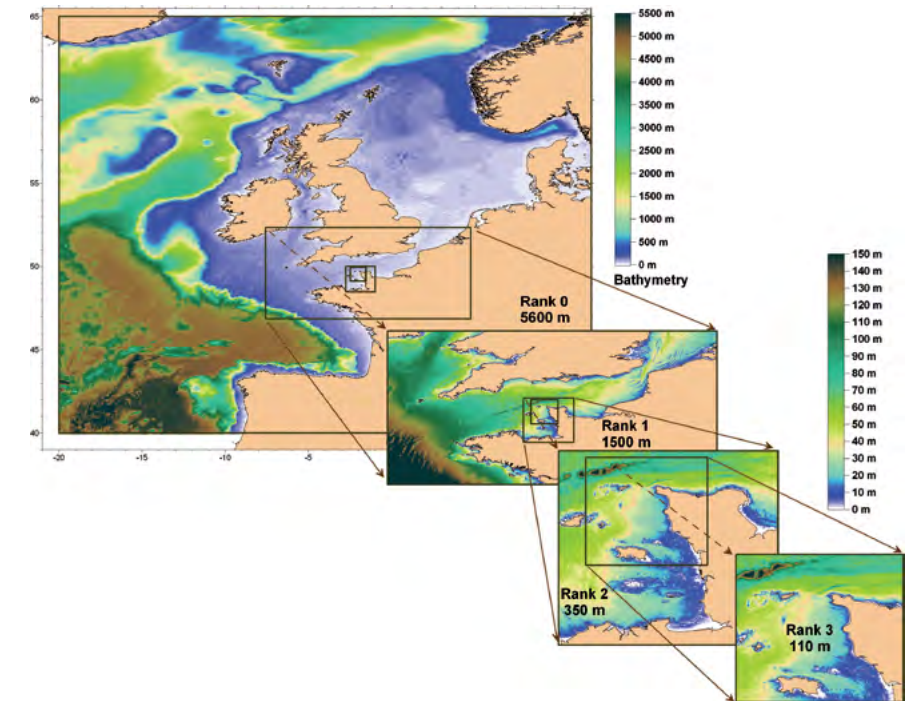


Figure 27. Emboîtement des modèles générant les conditions aux limites du modèle de La Hague en champ proche.

Tableau 4. Principales caractéristiques des modèles générant les conditions aux limites du modèle de La Hague en champ proche.

Modèle	Résolution (mètres)	Nombre de colonnes	Nombre de lignes	Nombre de mailles	Rapport durée simulation/temps calcul (PC-1,5 GHz)
Rang 0	5 637 m	421	501	210 921	667
Rang 1	1 606 m	124	185	22 940	1 746
Rang 2	350 m	263	248	65 224	134
Rang 3	110 m	600	653	391 800	7

Ce type de modèle résout les équations de la dynamique des fluides pour un système à deux dimensions (équations dites de Saint Venant), c'est-à-dire les équations de Navier-Stokes intégrées sur la verticale. Elles s'écrivent comme suit :

$$E1 \begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fv - K \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + g \frac{u \|\vec{u}\|}{k^2 H^{4/3}} + \frac{\tau_x}{\rho H} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fu - K \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + g \frac{v \|\vec{u}\|}{k^2 H^{4/3}} + \frac{\tau_y}{\rho H} = 0 \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

avec :

- u, v : composantes ouest \rightarrow est et sud \rightarrow nord de la vitesse ;
- x, y : coordonnées horizontales ;
- t : temps ;
- H : position du fond par rapport au niveau de référence ;
- ζ : élévation de la surface libre par rapport au niveau de référence ;
- f : coefficient de Coriolis ;
- k : coefficient de frottement sur le fond ;
- K : coefficient de diffusion horizontale ;
- ρ : masse volumique de l'eau ;
- g : accélération de la pesanteur ;
- τ_x, τ_y : composantes de la tension de vent (ouest \rightarrow est et sud \rightarrow nord).

3.2.3.1 Conditions aux limites

Le modèle fonctionne dans un système de coordonnées sphériques (pas en longitude et en latitude constant). Il est piloté aux limites ouvertes sur le large par la seule variation du niveau de la surface libre associée à la progression de l'onde de marée. Aucun contrôle sur les vitesses n'est effectué. Le positionnement de la surface libre est calculé par le modèle d'emprise supérieure. Pour le modèle de plus grande emprise (rang 0), les conditions aux limites étaient établies initialement à partir de l'atlas des composantes harmoniques de Schwiderski (Schwiderski, 1983), puis à partir des observations satellitaires Fes2004 (Lyard *et al.*, 2006) avec la prise en compte des huit principales composantes harmoniques du spectre de la marée astronomique. Les limites du modèle de grande emprise ont été repoussées au-delà de la marge continentale afin que le vent n'y affecte que très peu les dénivellations de la surface libre. Chaque modèle d'emprise supérieure fournit les conditions aux limites pour le modèle d'emprise immédiatement inférieure (rang 0 \rightarrow rang 1 \rightarrow rang 2 \rightarrow rang 3). Les conditions aux limites fermées (profondeurs nulles) sont de simples conditions de flux nul.

Les conditions à la limite en surface correspondent aux forces de frottement exercées

par le vent sur la mer. L'expression du tenseur de surface s'exprime par ses deux composantes τ_x, τ_y ; elle peut être formulée comme suit :

$$E2 \begin{cases} \tau_x = \rho_a C_d U \|\vec{U}\|^p \\ \tau_y = \rho_a C_d V \|\vec{U}\|^p \end{cases}$$

avec :

- τ_x, τ_y : composantes de la tension de vent en $N.m^{-2}$ selon les axes x et y (ouest \rightarrow est et sud \rightarrow nord) ;
- U, V : composantes de la vitesse du vent en $m.s^{-1}$ selon les axes x et y (ouest \rightarrow est et sud \rightarrow nord) ;
- C_d : coefficient de traînée = 0,0015 ;
- ρ_a : masse volumique de l'air en $kg.m^{-3}$;
- p : paramètre d'ajustement du vent (1-1,48 cf. [chapitre 3.1.2](#)).

Les conditions à la limite au fond correspondent aux forces de frottement associées au déplacement de l'eau par rapport au fond. L'expression du tenseur surfacique des efforts sur le fond s'exprime comme suit :

$$E3 \begin{cases} \tau_x = \rho g \frac{u \|\vec{u}\|}{k^2 H^{1/3}} \\ \tau_y = \rho g \frac{v \|\vec{u}\|}{k^2 H^{1/3}} \end{cases}$$

avec :

- τ_x, τ_y : composantes de la tension sur le fond en $N.m^{-2}$ selon les axes x et y (ouest \rightarrow est et sud \rightarrow nord) ;
- u, v : composantes de la vitesse des particules d'eau par rapport au fond selon les axes x et y (ouest \rightarrow est et sud \rightarrow nord) ;
- H : hauteur de la colonne d'eau ;
- k : coefficient de rugosité dit de Strickler ;
- ρ : masse volumique de l'eau de mer ;
- g : accélération de la pesanteur.

Les principaux paramètres qui sont susceptibles d'être améliorés par la validation sont le mode de calcul du coefficient de traînée C_d dû au vent (p dans équation E2), le coefficient de diffusion et le coefficient de rugosité sur le fond k (équation E3).

3.2.3.2 Bathymétrie automatique pour les modèles

Ce chapitre reprend les principaux résultats publiés dans (Bailly du Bois, 2011), [annexe 10.8](#).

La bathymétrie intégrée au modèle était issue initialement de la base de données constituée à l'Ifremer à partir de la numérisation des cartes marines du Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM). Il est apparu que cette bathymétrie était insuffisamment précise dans la région du cap de La Hague et dans le golfe de Gascogne. La simulation des courants et hauteurs d'eau a été améliorée significativement en intégrant et en collectant des données bathymétriques plus précises et homogènes, non seulement dans l'emprise du modèle de détail, mais aussi à l'échelle du plateau continental, en exploitant par exemple les levés effectués en route par le Côtes de la Manche.

J'ai été alors confronté à plusieurs problèmes :

- l'assimilation de jeux de données hétérogènes en précision et résolution ;
- le référencement des profondeurs par rapport à une altitude exploitable par les modèles ;
- la prise en compte réaliste des zones côtières et intertidales.

Il en résultait que la construction de modèles numériques de terrain utilisables par les modèles était longue et fastidieuse. Elle représentait le principal facteur limitant la réalisation de nouveaux modèles ayant une emprise et une résolution adaptée aux besoins. J'ai mis au point une méthodologie et des algorithmes répondant à ces besoins, qui permettent de construire en quelques heures un nouveau modèle. Cette méthode est actuellement appliquée à l'Ifremer pour le modèle MARS3D.

3.2.4 Calage physique du modèle

Durant les heures suivant un rejet l'influence du vent n'est pas significative car la dynamique de marée de la région du cap de La Hague est largement prépondérante. Le coefficient de diffusion est relativement facile à évaluer en comparant l'étalement horizontal des panaches simulés et mesurés. Une fois le forçage aux limites ouvertes du modèle établi, la dynamique de marée est contrôlée principalement par le coefficient de frottement sur le fond. Ce forçage est représenté dans le modèle par un coefficient de Strickler choisi uniforme sur l'ensemble des emprises de calcul. Le critère appliqué pour comparer la dynamique mesurée et simulée est la comparaison des odographes intégrés dans une zone ayant une bathymétrie homogène, située dans le flux principal des courants du cap de La Hague. Cette station représente une sorte de « mesure » de l'hydrodynamique de la zone, elle-même représentative de l'amplitude des courants de marée en Manche. Le carré du courant moyen sur la colonne d'eau est considéré représentatif de l'énergie transitant dans la zone. Le résultat de la comparaison entre les valeurs mesurées

et simulées est présenté figure 28. Il montre une grande sensibilité du modèle vis-à-vis du coefficient de Strickler. La valeur de 31 retenue par cette approche donne simultanément les meilleurs résultats pour la comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées.

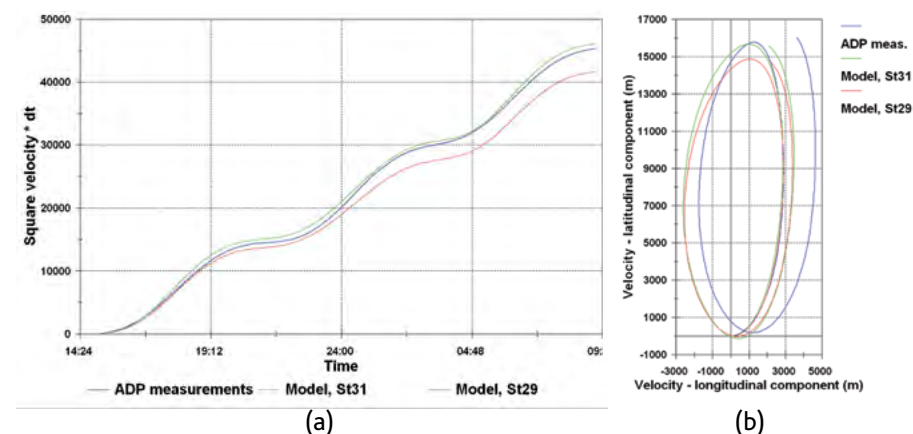


Figure 28. a) Odographe intégré du carré du module de la vitesse mesurée et simulée à Flamanville les 10 et 11 août 2003, b) Odographe de la vitesse correspondante.

Un exemple de comparaison de vecteurs courants moyens mesurés et simulés est présenté sur la figure 29. Les vitesses mesurées et simulées sont similaires mais un décalage temporel entre le modèle et les observations est visible. Il correspond à des durées différentes de flot et de jusant mesurées et simulées ; le flot est plus long d'environ 15 minutes pour les observations que pour les simulations (repères verticaux sur les figures). Cet écart limite la précision temporelle de la comparaison modèle/mesures.

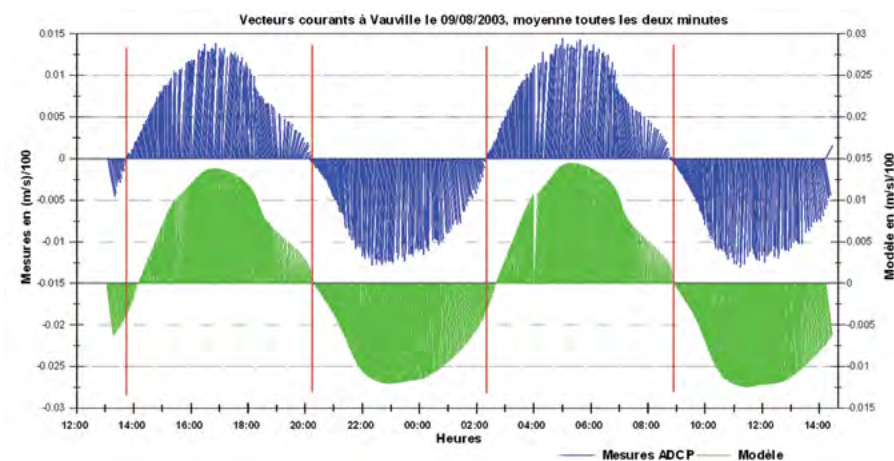


Figure 29. Vecteurs courants à Vauville les 9-10 août 2003.

La moyenne de l'écart entre toutes les vitesses mesurées et simulées à Vauville et à Flamanville est présentée sur le tableau 5.

Tableau 5. Écart moyen entre les vitesses mesurées et simulées à Vauville et Flamanville.

	Vauville		Flamanville	
	Module	Direction	Module	Direction
Moyenne	4 %	4,7°	1 %	2,6°
Écart-type	20 %	12°	10 %	6,4°

Les écarts observés peuvent résulter des facteurs suivants :

- représentation imparfaite de la bathymétrie, à l'échelle de la zone d'étude, mais aussi à l'échelle de la Manche et du plateau continental ;
- imprécision des conditions aux limites de marée appliquées au grand modèle (rang 0) ;
- coefficient de Strickler homogène qui ne représente pas fidèlement le frottement sur le fond. Des tentatives d'amélioration de cette représentation ont été réalisées en modulant le coefficient de Strickler avec la granulométrie du fond. Les tests simples réalisés n'ont pas amélioré la représentativité du modèle. Ce sujet mériterait des travaux plus étoffés (chapitre 7.2.1).

3.2.4.1 Levés marégraphiques

Un autre moyen de contraindre les résultats de modèles hydrodynamiques est de comparer les hauteurs d'eau mesurées et simulées. Ce travail peut être réalisé à l'aide de marégraphes existants dans les ports ; la validation du modèle Mars a largement exploité ces données. Pour améliorer la précision de cette comparaison, des données plus détaillées ont été nécessaires.

Le site du cap de La Hague est particulièrement intéressant de ce point de vue. Il représente une frontière vis-à-vis de la propagation de l'onde de marée : une différence de marnage de quatre mètres existe entre le nord et le sud du cap qui sont distants de 5 km. Cette frontière vis-à-vis de la marée peut être également sensible pour l'influence du forçage météorologique. C'est pourquoi j'ai mis en place depuis plusieurs années des marégraphes en plusieurs zones du cap, destinés à enregistrer les fluctuations du niveau moyen et de les confronter aux résultats de simulation. Il est ainsi possible de tester plus finement la représentation de la marée et des forçages météorologiques pris en compte par le modèle. La méthode de mise en place des marégraphes a été simplifiée de manière à obtenir des enregistrements de qualité à distance des infrastructures portuaires.

La base de données acquise a mis en évidence des phénomènes singuliers, tels qu'un « creux » dynamique à l'ouest du cap de La Hague qui serait associé au moins partiellement aux courants de marée.

3.2.4.2 Flotteur dérivant comme courantomètre mobile

La comparaison de données de trajectoires issues de flotteurs dérivants avec des résultats de simulation est délicate car les écarts successifs entre les trajectoires simulées et mesurées entraînent rapidement une divergence qui rend les comparaisons impossibles. J'ai exploité les données de flotteurs comme des mesures d'un courantomètre dérivant. Elles ont ensuite été comparées avec les courants simulés aux mêmes dates et lieux. Il a été ainsi possible de dresser une carte des écarts modèle/mesures sur la zone couverte par les trajectoires de flotteurs. Ce type de carte permet de mettre en évidence les zones où un modèle est moins représentatif et de cibler, par exemple, les zones où il est utile d'améliorer la bathymétrie du modèle.

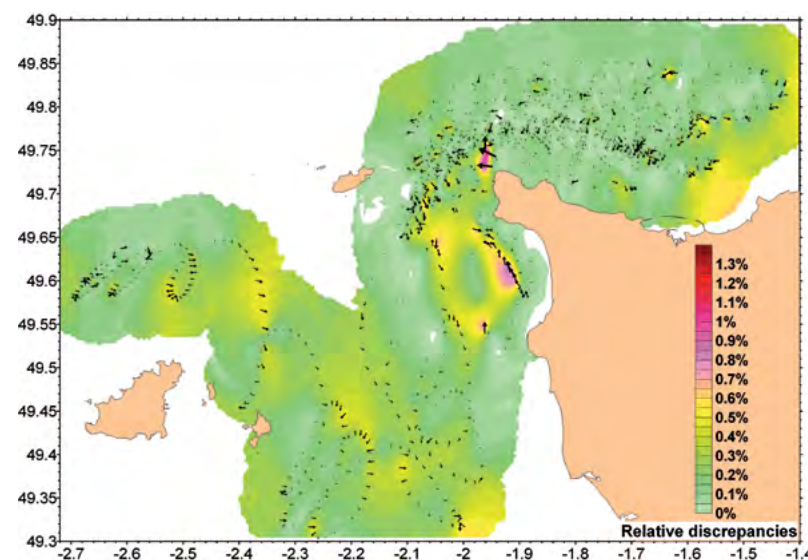


Figure 30. Comparaisons entre les courants simulés et déduits des trajectoires de flotteurs dérivant.

3.2.5 Comparaisons des concentrations mesurées et simulées

Pour chaque mesure acquise *in situ*, le modèle a simulé la concentration au même lieu et à la même heure. Ces deux séries de valeurs ont servi à la comparaison entre

les concentrations mesurées et simulées. Les radiales exploitables ont été sélectionnées lorsque les mesures ont montré que le panache de rejet avait effectivement été traversé, et qu'il était possible de préciser de quel rejet il s'agissait. Au-delà de 48 h après un rejet, ce tri ne peut généralement pas être effectué du fait du mélange des rejets successifs entre eux.

Au total, près de 200 radiales ont pu être exploitées entre 0 et 48 heures après le début du rejet ; elles totalisent plus de 3 000 mesures individuelles.

La capacité du modèle à reproduire les mesures acquises *in situ* a été testée en fonction des critères suivants :

- temps écoulé depuis le début du rejet ;
- distance du point de rejet ;
- direction initiale du panache par rapport au point de rejet (nord/sud) ;
- coefficient de la marée.

Les outils de comparaison suivants ont été retenus :

- écarts entre les coefficients de dilution maximums et moyens ; mesurés et simulés ;
- distance entre les positions du maximum du panache mesurées et simulées ;
- écart entre les largeurs des panaches mesurées et simulées.

Afin de comparer entre eux des rejets différents, toutes les données de concentrations ont été converties en facteurs de dilution.

Les caractéristiques du modèle de détail (2 dimensions, maille de 110 mètres de côté) ont été choisies de manière à représenter de manière réaliste le panache de rejet une heure après son émission. Elles ne permettent pas de représenter la dilution durant les secondes et les minutes suivant le rejet ; il faut construire pour cela un modèle en trois dimensions avec une maille élémentaire plus petite (cf. [paragraphe 3.3](#)).

3.2.6 Conclusion de la validation 2D en champ proche

La figure 31 donne un exemple de comparaison modèle/mesures pour un rejet effectué vers le nord. La figure 32 et la figure 33 comparent les coefficients de dilutions moyens et maximum mesurés et simulés pour l'ensemble des transects pris en compte lors de la comparaison modèle/mesures.

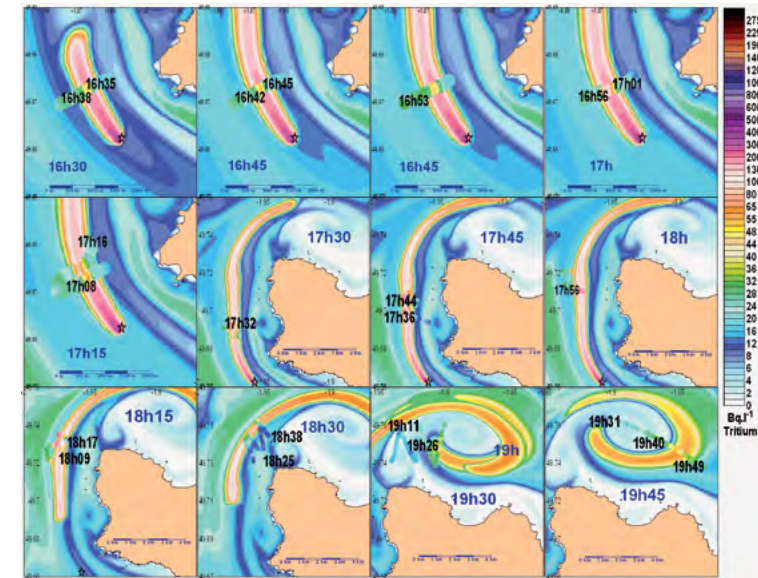


Figure 31. Exemple de confrontation modèle/mesures le 12 juin 2003 de 16 h à 20 h.

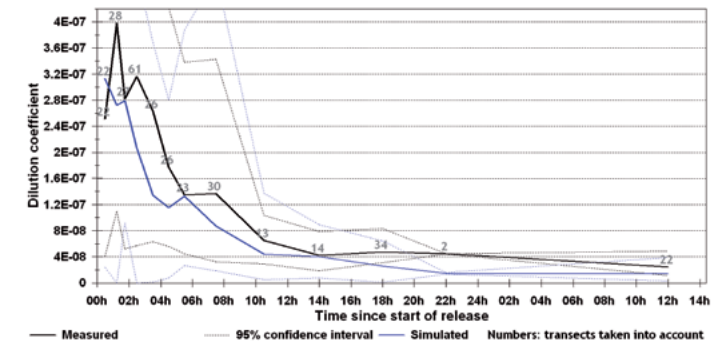


Figure 32. Coefficients de dilution moyens mesurés et simulés.

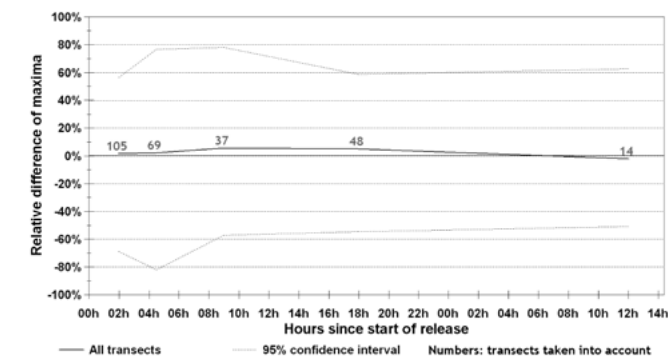


Figure 33. Écart entre les coefficients de dilution maximums mesurés et simulés.

La qualification des modèles mis en œuvre aboutit aux conclusions générales suivantes :

- les modèles permettent la simulation réaliste de la dispersion de rejets ponctuels au-delà de 1 km d'un émissaire et entre une heure et un an après le début d'un rejet ;
- les modèles ne sous- ou ne surestiment pas les concentrations simulées par rapport aux concentrations mesurées ; les concentrations mesurées et simulées sont toujours proches ;
- l'essentiel de la dilution se produit durant les 24 heures suivant un rejet. Après 48 heures, les concentrations obtenues sont du même ordre de grandeur que celles résultant des rejets effectués durant les semaines précédentes ;
- le panache mesuré se trouve toujours dans la même zone que le panache simulé ;
- au-delà de 30 km de l'émissaire, la comparaison des concentrations ponctuelles mesurées et simulées à l'échelle de la Manche montre un écart moyen de 6 % avec un écart-type de 44 % ;
- la base de données de mesures physiques et de traceurs acquise *in situ* est particulièrement riche ; elle peut constituer un étalon pour la validation des modèles. Elle est largement utilisée dans les études concernant l'implantation d'hydroliennes dans le raz Blanchard.

Le tableau 6 présente les résultats de comparaison modèle/mesures pour des modèles de plus grande emprise et de résolution moins précise que le modèle de champ proche. Il fournit une indication du type de modèle le plus adapté pour simuler la dispersion en fonction du temps et de la distance d'un émissaire.

Tableau 6. Caractéristiques comparées des modèles utilisés pour la simulation de la dispersion des rejets radioactifs solubles dans le milieu marin du Cap de La Hague.

	Modèle cap de La Hague, rang 3	Modèle golfe normand-breton, rang 2	Modèle Manche, rang 1
Domaine d'utilisation dans l'espace	De 1 km à 20 km de l'émissaire	De 20 km à 100 km de l'émissaire	De 20 km à 200 km de l'émissaire
Domaine d'utilisation dans le temps	Entre 1 h et 48 h après le début d'un rejet	Entre 12 h et 1 mois après le début d'un rejet	Entre 48 h et 1 an après le début d'un rejet
Résolution horizontale, pas de temps	110 mètres, 15 secondes	400 mètres, 1 minute	1 666 mètres, 4 minutes

	Modèle cap de La Hague, rang 3	Modèle golfe normand-breton, rang 2	Modèle Manche, rang 1
Écart concentrations moyennes	9 % (- 66 % → 70 %)	- 1 % (- 44 % → 52 %)	- 13 % (- 47 % → 41 %)
Écart concentrations maximales	3 % (- 72 % → 73 %)	- 16 % (- 64 % → 56 %)	6 % (- 38 % → 50 %)
Écart largeur du panache	- 6 % (- 73 % → 65 %)	- 2 % (- 80 % → 73 %)	9 % (- 70 % → 36 %)
Écart position du panache/distance du point de rejet	- 1 % (- 22 % → 22 %)	5 % (- 61 % → 96 %)	3 % (- 54 % → 83 %)

3.3 Validation 3D de la dispersion dans le champ proche d'un émissaire (programme Disver)

La simulation de la dispersion en 2D a montré ses limites dans le cadre du projet Dispro : il n'est pas possible de représenter la progression verticale d'un panache effectué au fond avant qu'il ne parvienne à la surface, à environ un kilomètre de l'émissaire considéré. D'autre part des écarts ont été observés entre les concentrations mesurées et simulées lorsque le panache rejeté progresse au nord du cap de la Hague, dans une zone où la profondeur est triplée en quelques kilomètres (de 30 à 90 mètres au-dessus de la fosse de La Hague). Il est probable que des effets tridimensionnels expliquent ces écarts.

Le programme [Disver](#) se situe dans la continuité du programme Dispro, avec comme défi la possibilité de collecter des mesures à haute fréquence simultanément sur toute la colonne d'eau.

3.3.1 Prélèvement dynamique en profondeur

Ce chapitre reprend les principaux résultats soumis dans (Bailly du Bois *et al.*, *Submitted-b*), [annexe 10.9](#).

La validation de modèles de dispersion tridimensionnels à proximité d'un émissaire nécessite l'acquisition de mesures spatio-temporelles représentatives de la dynamique simulée. Les observations ou mesures en surface ne sont plus suffisantes et il devient indispensable d'échantillonner simultanément depuis la surface jusqu'au fond. Le programme Disver ayant pour objectif la validation

de modèles dans la zone du raz Blanchard en présence de courants de 2 à 5 m.s⁻¹, à proximité des côtes, il a fallu imaginer une méthodologie et des instruments adaptés. Un système complet a été mis au point, il comprend :

- un automate capable d'échantillonner en continu 10 prélèvements toutes les 30 secondes ;
- une ligne permettant des prélèvements en profondeur et en continu à dix niveaux simultanément ;
- un lest dépresseur maintenant la ligne immergée pendant que le navire fait route normalement.

Ce système a été utilisé en routine durant le programme *Disver* pour prélever à dix niveaux jusqu'à 20 et 60 mètres de profondeur, à raison de 1 200 échantillons par heure.

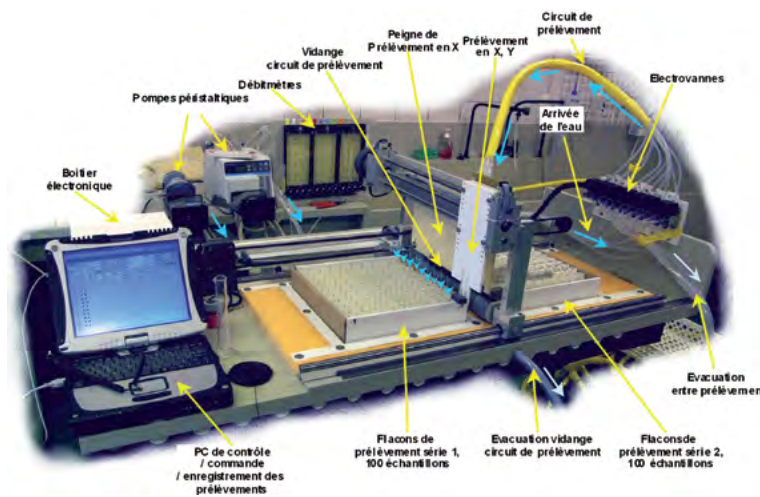


Figure 34. Automate de prélèvement.



(a)

(b)

Figure 35. DYNALTEST, a : essai en canal, b : mise à l'eau.

3.3.2 Premiers résultats

Plusieurs modèles ont été construits pour simuler en trois dimensions la dispersion depuis l'émissaire de rejet avec une résolution horizontale de 10 mètres, jusqu'au nord du cap de La Hague pour prendre en compte l'influence du gradient bathymétrique de la fosse de La Hague (résolution de 100 mètres, figure 36).

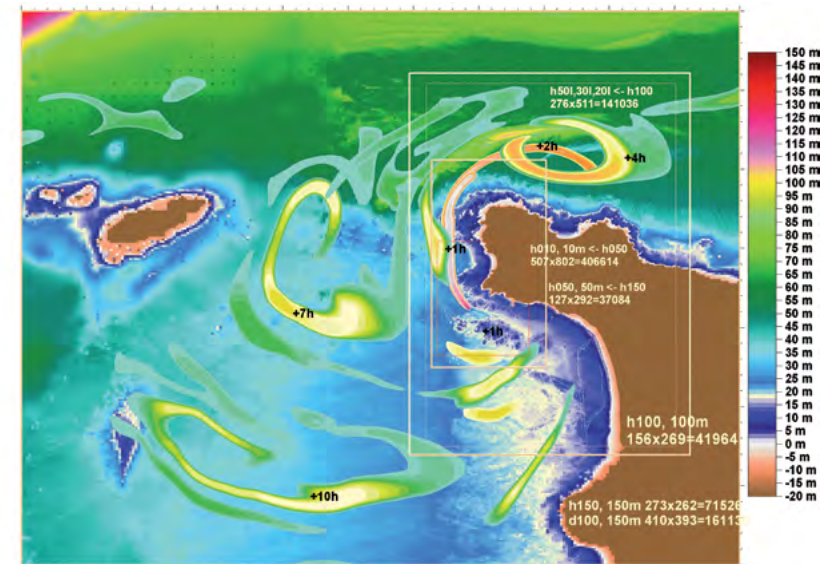


Figure 36. Emprises et résolutions des modèles 3D développés durant le programme *Disver*.

Les résultats acquis montrent une grande variabilité spatiale et temporelle des panaches mesurés à proximité de l'émissaire. En quelques minutes, les structures de dispersion se transforment radicalement, avec un étalement des panaches important (figure 37). Ces résultats sont interprétés comme l'influence de structures tourbillonnaires de plusieurs dizaines de mètres qui contrôlent la dispersion à proximité de l'émissaire. Le modèle MARS n'est pas adapté pour représenter la turbulence à cette échelle et d'autres outils de simulation devront être testés. À 5 km de l'émissaire la variabilité des panaches mesurés s'atténue et le modèle MARS devient représentatif (figure 38). À plus grande distance, le panache a pu être mesuré jusqu'à 60 mètres de profondeur (figure 39). L'exploitation et la confrontation modèle/mesures de ces résultats est en cours.

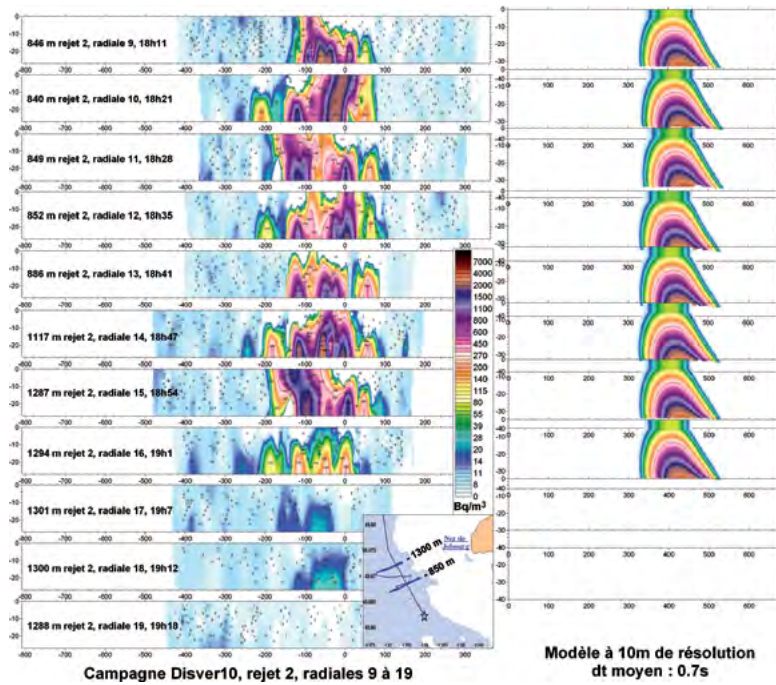


Figure 37. Coupe verticale du panache de rejet d'AREVA-NC à 850 et 1 300 mètres de l'émissaire : mesures et simulation des concentrations en tritium.

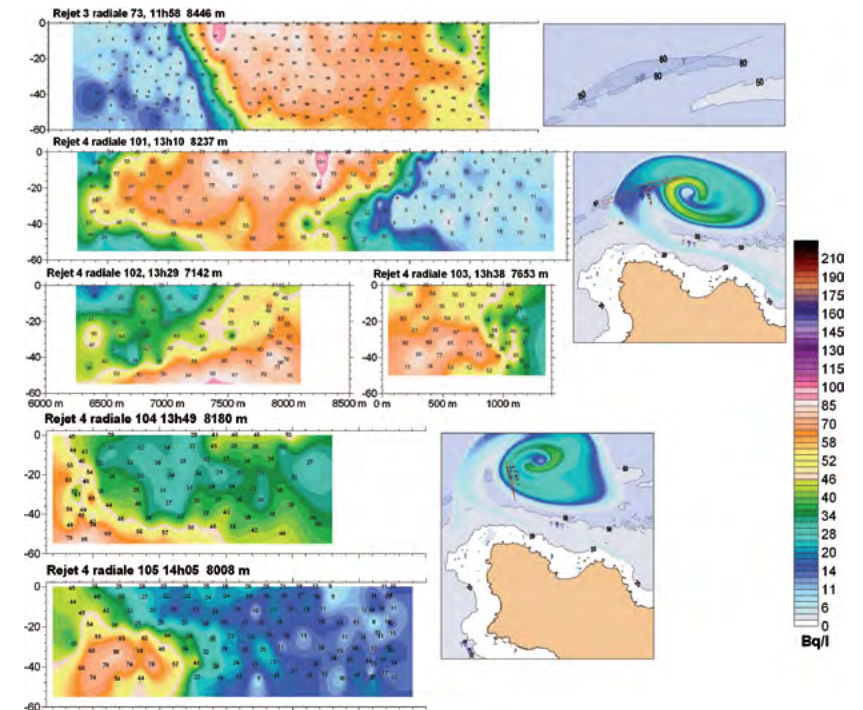


Figure 39. Coupe verticale du panache de rejet d'AREVA-NC à 8 km de l'émissaire, au-dessus de la fosse de La Hague.

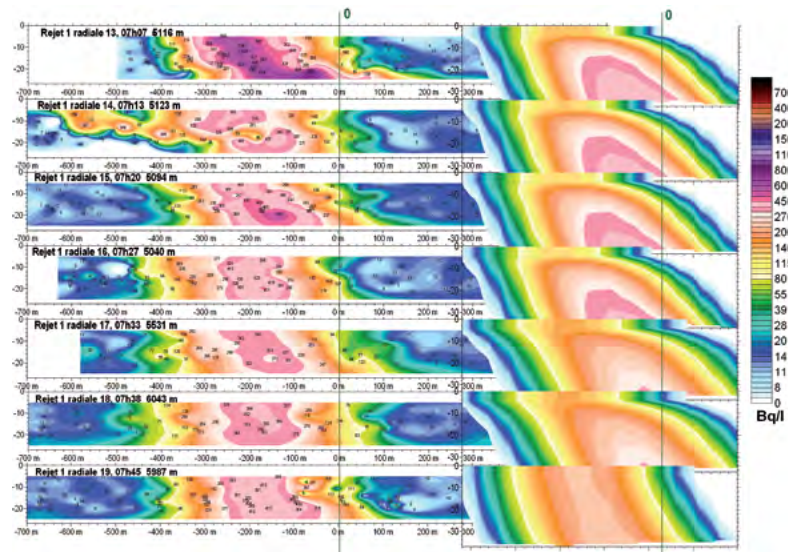


Figure 38. Coupe verticale du panache de rejet d'AREVA-NC entre 5 000 et 6 000 mètres de l'émissaire : mesures et simulation des concentrations en tritium.

CHAPITRE 4

Modèles de transfert de radionucléides

Une description détaillée des travaux est réalisée dans (Bailly du Bois, 2003). Une synthèse est présentée dans l'[annexe 10.10](#) (Bailly du Bois and Dumas, 2005 b).

L'existence de modèles de dispersion validés pour l'hydrodynamique et le transport de substances dissoutes autorise le calcul des échanges entre l'eau de mer et les autres compartiments du milieu, comme les sédiments et les espèces vivantes. Les transferts vers ce dernier compartiment sont d'autant plus importants que c'est surtout par les espèces consommées que l'homme sera concerné par les pollutions radioactives. Des modules de transfert ont été intégrés au modèle de courants résiduels AMANDA décrit au [chapitre 3.1](#), pour créer le modèle TRANSMER (Bailly du Bois, 2002, 2003, 2004b ; Bailly du Bois and Dumas, 2004c, 2005b), [annexe 10.9](#). Les mesures de radiotraceurs permettent de tester les hypothèses de calcul dans les différentes matrices. Les calculs effectués pour les espèces et radionucléides dont

on connaît la cinétique d'échange ont montré un très bon accord (Fiévet *et al.*, 2006). En raison des cinétiques plus lentes, les concentrations varient moins rapidement et écarts modèle/mesures constatés sont plus faibles que pour l'eau de mer. Ces premiers résultats ouvrent la voie au développement de modèles intégrés simulant de manière réaliste le devenir, les flux et les quantités de radionucléides au sein des différents compartiments de l'écosystème. Le développement de tels modèles implique le renseignement de bases de données de répartition des espèces vivantes et sédimentaires. Ce travail a été initié au travers de plusieurs stages ([Ozouf, 2000 ; Struski, 1999], figures 40 et 41).

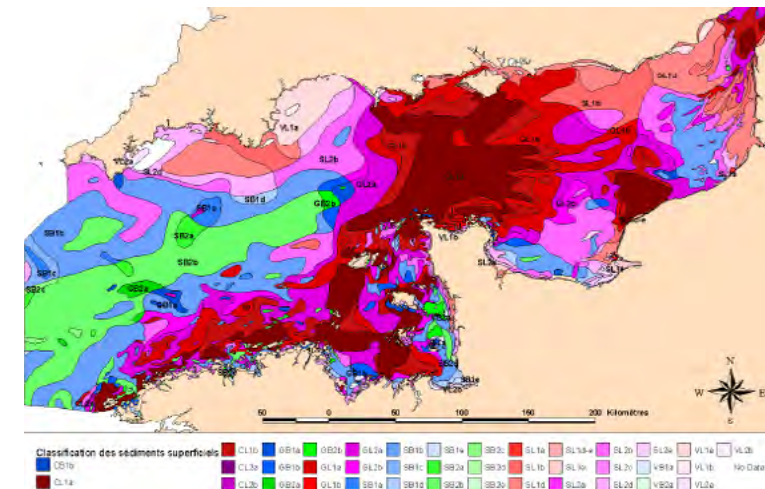


Figure 40. Carte des sédiments superficiels de la Manche numérisée (Struski, 1999 ; Vaslet *et al.*, 1979).

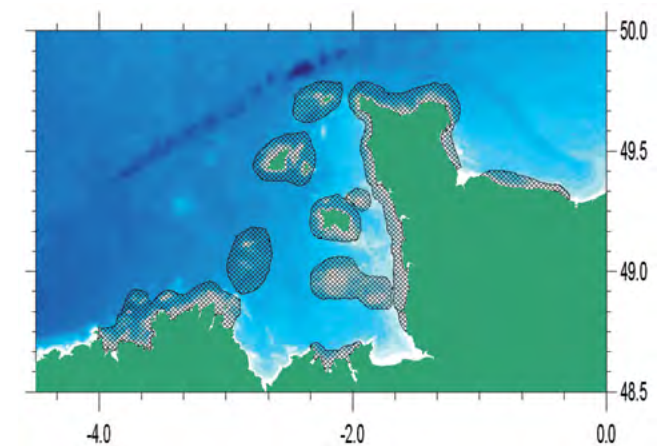


Figure 41. Cartographie des zones de pêche du homard (Ozouf, 2000).

CHAPITRE 5

Transport sédimentaire

Lorsque le forçage hydrodynamique est bien établi, il est possible de l'exploiter pour simuler le transport et le dépôt des particules sédimentaires. Ce domaine a été abordé, en parallèle des travaux sur la dispersion marine, par l'encadrement de deux post-doctorats, une thèse et plusieurs stages.

5.1 Conditions initiales pour les modèles hydrosédimentaires

Les modèles hydrosédimentaires nécessitent comme conditions initiales de connaître la nature granulométrique des sédiments déposés. Cette information n'existant pas à l'échelle de la Manche. La carte sédimentaire de la Manche (Vaslet *et al.*, 1979) a été numérisée dans ce but (Struski, 1999). J'ai exploité les courbes granulométriques réalisées dans sa thèse par Claude Larssonneur (Larssonneur, 1971) pour définir

des fonctions analytiques permettant de connaître la proportion de n'importe quelle classe granulométrique pour chacun des faciès de la carte de la Manche (Bailly du Bois, 2000). Les modèles hydrodynamiques de la Manche peuvent ainsi être initialisés avec les répartitions de classes granulométriques choisies par le modélisateur.

5.2 Construction d'un modèle de transport des sédiments grossiers hétérométriques

Un modèle adapté à la dynamique de la Manche a été construit (Cugier, 2000). Il a permis par exemple de représenter les trajectoires résiduelles des différentes classes de particules à l'échelle de la Manche (figure 42). Il est adapté à la simulation du transport des sédiments grossiers hétérométriques rencontrés en Manche, en prenant en compte les phénomènes de dépôt et d'érosion.

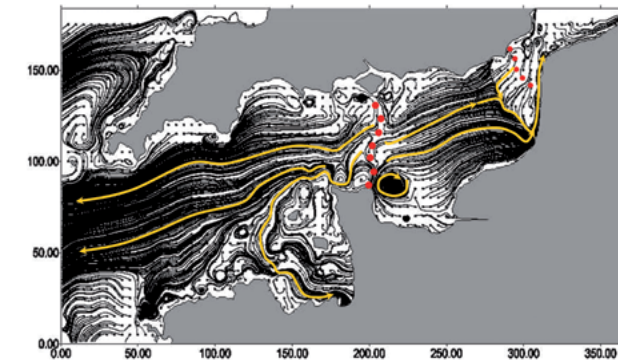


Figure 42. Trajectoires des particules de diamètre 0,2 mm déplacées par charriage.

Un effort important a été consacré à l'acquisition de données expérimentales et *in situ* pour contraindre les modèles mis en œuvre. Ces mesures ont permis de caractériser le comportement de mélanges hétérométriques de particules en canal et de proposer des formulations représentatives des phénomènes de masquage (Olivier, 2004). Les mesures acquises dans le cadre de la thèse d'Olivier Blanpain ont permis de quantifier, à l'aide des radiotraceurs, la migration verticale des particules marquées au sein d'un sédiment grossier en équilibre hydrodynamique.

5.3 Observation du transport sédimentaire *in situ* (DYSPI)

Ce chapitre reprend les principaux résultats publiés dans (Blanpain *et al.*, 2009), [annexe 10.11](#).

J'ai imaginé le DYSPI pour dépasser les limitations associées à la mesure et l'observation des processus de transport sédimentaire en laboratoire. Toute la dynamique et la complexité des processus réels ne peuvent être reproduite et il me semblait indispensable d'« aller voir » ce qui se passait au fond de la mer pour utiliser à bon escient les formulations ou simplifications appliquées dans les modèles. Le défi posé consistait à obtenir des données précises et quantifiées, sur la dynamique des sédiments déposés simultanément en surface et en profondeur. Il fallait également pouvoir intervenir dans les substrats les plus dynamiques et donc les plus grossiers rencontrés en Manche, dans les conditions hydrodynamiques qui construisent ces substrats (renverses de fortes marées, houle). Le DYSPI a été conçu dans cette perspective (figure 43) : une caméra filme simultanément la surface du dépôt sédimentaire et le profil sédimentaire *via* un périscope inversé introduit dans le sédiment (figure 44). Le mode de pénétration par rotation transverse autorise la pénétration de substrats grossiers durs sans perturber l'interface eau/sédiment. Le profil de l'instrument minimise les perturbations de l'hydrodynamique durant les observations.

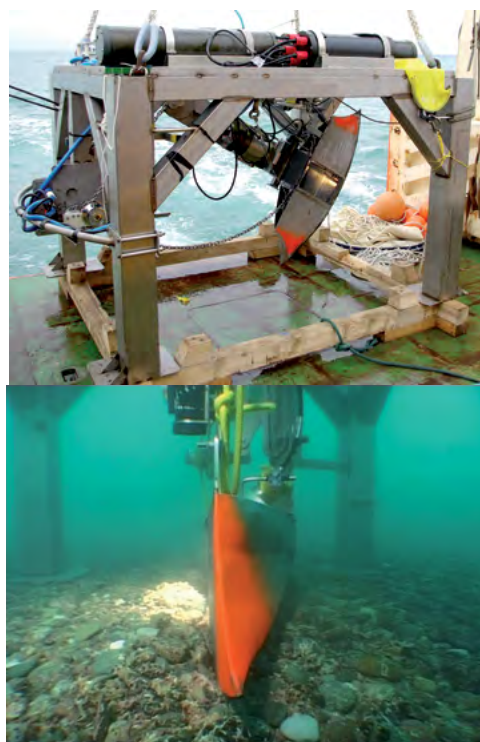


Figure 43. Système DYSPI pour l'observation *in situ* du transport sédimentaire, a) vue d'ensemble, b) posé au fond.



Figure 44. Image vue par le DYSPI haut : vue du profil vertical, bas : vue directe.

La programmation de l'acquisition vidéo et du déploiement de l'instrument a été réalisée par Michel Lunven à l'Ifremer. Avec l'ensemble des instruments associés à cette structure (courantomètres, turbidimètres, granulomètre laser), le DYSPI permet d'acquérir des observations *in situ*, dans des substrats grossiers, comparables à ce qui peut être obtenu en canal.

Il permet d'observer les conséquences de forçages inaccessibles en laboratoire, de tester l'influence de la marée et d'observer *in situ* les processus décrits par les équations de transport (Blanpain, 2009). La variabilité temporelle des processus en jeu a été mise en évidence et les flux de transport ont pu être quantifiés. En complément, les mesures de radiotraceurs ont fourni des données intégrées permettant d'apprécier la cinétique des processus mis en jeu, de valider les trajectoires des particules et de quantifier la pénétration en profondeur des particules dans des substrats à l'équilibre hydrodynamique.

Tous les outils sont en place pour progresser dans la connaissance de la dynamique hydrosédimentaire à l'échelle de la Manche : modèle de transport, mesures de radiotraceurs permettant de tester des processus dans le temps et dans l'espace, outils d'observation et de mesure des processus *in situ* (chapitre 7.5).

CHAPITRE 6 Développements et réponses institutionnelles

L'IRSN se doit de répondre aux demandes institutionnelles, industrielles et sociétales concernant le devenir des radionucléides dans l'environnement. Dans ce contexte, mes travaux ont répondu aux demandes de l'industriel AREVA-NC. Les travaux réalisés dans le cadre du GRNC en sont un autre exemple (§ 6.2). D'autres demandes ont concerné la rédaction de documents de synthèse (Bailly du Bois et Rancillac, 1998) ou de chapitres d'ouvrages (Adam-Guillermin *et al.*, 2010 ; Bailly du Bois, 2007 ; Charmasson *et al.*, 2013 ; Guéguéniat *et al.*, 1993a ; Guéguéniat *et al.*, 1997a ; Lebaron-Jacobs *et al.*, 2009), d'industriels intéressés par l'hydrodynamique en Manche (hydroliennes, éoliennes), ou de besoins de formation à la dispersion en mer pour des projets de production nucléaire à l'étranger (Égypte, Tunisie, Vietnam). La reconnaissance de ces compétences a été officialisée en 2009 par ma nomination en tant qu'expert de l'IRSN concernant

la dispersion des radionucléides en mer et leur modélisation. Cette nomination a été renouvelée en juillet 2013 pour un mandat de quatre ans en tant qu'expert confirmé. La figure 45 donne un exemple de document fourni par la France dans le cadre de la convention OSPAR (*Convention for the protection of the marine environment of the North East Atlantic*). À cette occasion, des simulations de la dispersion de trente radionucléides ont été réalisées durant 10 années à l'échelle du plateau continental.

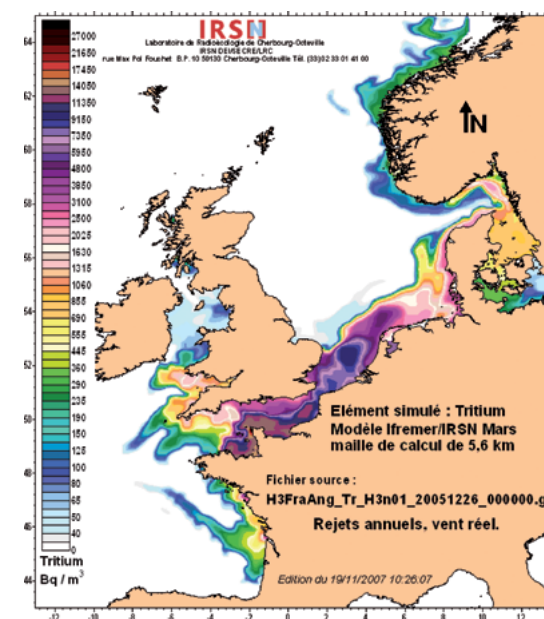


Figure 45. Simulation de la dispersion du tritium rejeté par les installations françaises et anglaises en décembre 2005 ; document réalisé pour la convention OSPAR.

6.1 Programmes européens et communications

J'ai participé à plusieurs programmes européens concernant la dispersion des radionucléides en mer et la modélisation : ces programmes ont permis de connaître et travailler avec la communauté européenne concernée par la dispersion des radionucléides en mer et sa modélisation.

Je participe régulièrement aux congrès et conférences concernant la radioécologie marine et la modélisation de la dispersion en mer (§ 10.1). Ces congrès sont des occasions privilégiées pour entretenir les contacts avec la communauté internationale et faire connaître les travaux du laboratoire. Il en ressort qu'il existe peu d'autres régions où la confrontation modèle/mesures de dispersion soit comparable à ce qui a été fait en Manche. Des conférences sur la dispersion des radionucléides en mer sont

réalisées occasionnellement à l'invitation d'universités, laboratoires, [commissions locales d'informations](#) (CLI). Des cours ont été dispensés à l'université de Rouen en Master 2, et à l'[Institut de la mer de Cherbourg](#) (CNAM - INTECHMER).

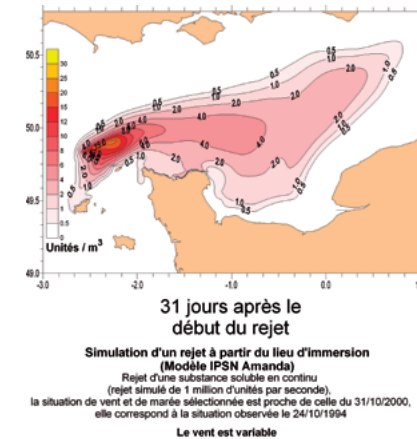
6.2 Groupe radioécologie Nord-Cotentin, comparaison modèles/mesures de radionucléides en milieu marin

En 1997, suite à un article du Professeur Viel évoquant un excès de leucémies dans le canton de Beaumont-Hague, le [Groupe radioécologie Nord-Cotentin](#) a été mandaté par le [Ministère de l'environnement](#) en 1999 pour réaliser une évaluation exhaustive de l'impact de toutes les installations nucléaires du Nord-Cotentin depuis leur construction. Les connaissances acquises concernant la dispersion des radionucléides en mer ont été sollicitées dans le cadre du GT3, chargé des confrontations entre les valeurs de concentrations calculées et mesurées dans l'environnement. Dans ce cadre, j'ai établi les facteurs de dilution représentatifs des différentes zones côtières du Nord-Cotentin, proposé des méthodologies de comparaison adaptées aux objectifs et aux données disponibles, réalisé les calculs pour tous les compartiments du milieu marin, rédigé les synthèses et transmis les données au groupe chargé des calculs de dose (GT4) (Germain *et al.*, 1999 ; GRNC : Groupe Radioécologie Nord Cotentin *et al.*, 1999). À chaque étape, les choix proposés ont été validés par les membres du GRNC. Ce travail a concerné la majeure partie de mon activité en 1997 et 1998, il a été novateur dans la mesure où toutes les parties prenantes – institutions, industriels, associations – ont travaillé ensemble pour obtenir un consensus sur les méthodes, calculs et résultats d'évaluation de l'impact radiologique et dosimétrique de rejets dans l'environnement.

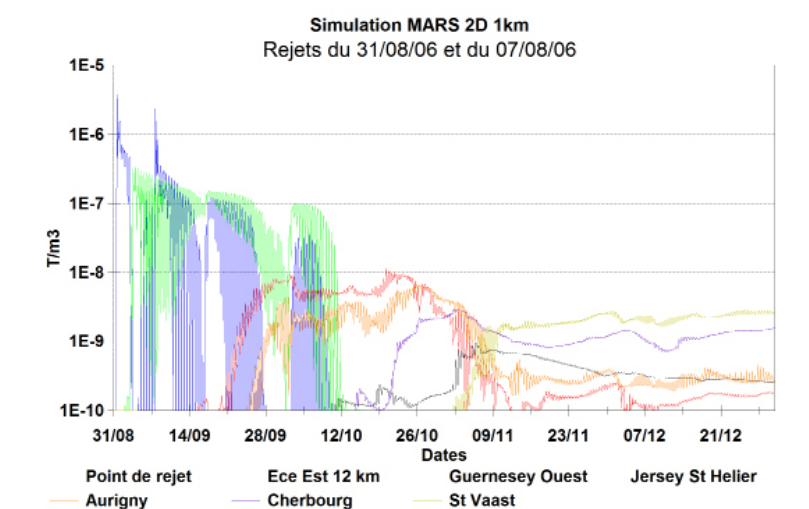
6.3 Crise, outils opérationnels

Les outils de modélisation mis en place pour simuler la dispersion des radionucléides en mer peuvent être appliqués à tout type de polluant soluble rejeté en situation normale ou accidentelle en milieu marin. Les premières sollicitations dans ce domaine ont concerné l'encadrement de la thèse de Christophe Douez, en initiant un outil de simulation de panaches destiné aux préfectures maritimes (Duez, 1993). Les outils de simulation et la validation des modèles progressant, j'ai été sollicité lors des naufrages du *levoli Sun* en 2000 (rejet de styrène, [Bailly du Bois *et al.*, 2001]), du sous-marin nucléaire *Koursk* en 2000, de l'*Ece* en 2006 (rejet d'acide phosphorique contenant de l'uranium dissous [Bailly du Bois *et al.*, 2006]) et lors de l'exercice INEX2000 (exercice de crise à la centrale de Gravelines [Bailly du Bois, 2001]). Des questions sont aussi posées régulièrement concernant l'impact de l'immersion

de déchets en Manche. La figure 46 montre des exemples du type d'informations qui ont été fournies durant les heures suivant un naufrage (Bailly du Bois, 2002 ; Bailly du Bois *et al.*, 2008 ; Bailly du Bois and Rancillac, 1998).



Dispersion d'une substance dans l'eau de mer lors du naufrage du *levoli Sun* en 2000.



Concentrations simulées à la côte lors de la vidange des cuves de l'*Ece* en 2006.

Figure 46. Exemples de résultats transmis lors de naufrages en Manche.

En prévision de ces demandes, plusieurs actions ont été menées depuis 1998 afin de rendre les modèles de dispersion plus aisés à mettre en œuvre en situation de crise. Il s'agit d'adaptations de modèles existants (Ifremer-Mars), d'outils pour la construction automatique de modèles, ou de la constitution de bases de données

adaptées aux simulations (bathymétrie, carte sédimentaire numérique, répartition de la biomasse, météo, rejets, paramètres de transfert...), d'optimisations et paramétrisations des modèles et de mise en forme des résultats. Une architecture d'outil opérationnel a été proposée (Bailly du Bois, 2003 ; Bailly du Bois *et al.*, 2008). Un soutien technique se poursuit pour aider à la mise en place d'outils opérationnels dans le cadre des outils de crise de l'IRSN.

6.4 L'accident de Fukushima

Ce chapitre reprend les principaux résultats publiés dans (Bailly du Bois *et al.*, 2012f), [annexe 10.12](#) et (Bailly du Bois *et al.*, 2014), [annexe 10.13](#).

L'accident de la centrale de Fukushima en mars 2011 a entraîné une mobilisation importante de l'IRSN ; le LRC a été fortement impliqué dans l'évaluation des conséquences pour le milieu marin. Compte-tenu du volume de mesures acquises *in situ*, il a été possible d'appliquer les méthodes éprouvées en Manche et mer du Nord pour évaluer la dispersion, les quantités introduites en milieu marin et tester les modèles de dispersion. Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs communications et publications (Bailly du Bois *et al.*, 2012d ; Bailly du Bois *et al.*, 2013 ; Bailly du Bois *et al.*, 2012f ; Laguionie *et al.*, 2012a). Les quantités introduites en mer ont été évaluées à partir des mesures effectuées par les japonais (figure 47). À partir de l'évolution des quantités mesurées, il a été possible de déduire les quantités rejetées au moment de l'accident et de construire une chronique des rejets à partir des mesures effectuées à proximité de l'installation (figure 48). Un modèle de dispersion, développé à l'Ifremer par Pierre Garreau, a été calé et comparé aux mesures *in situ* (figures 49 et 50). Il applique le même type de paramétrisation du coefficient de frottement du vent sur la mer que celui appliqué en Manche et mer du Nord (§ 3.1.2).

6.5 Vulgarisation

Le milieu marin et la radioactivité sont deux thèmes qui intéressent particulièrement les médias. La communication et l'explication des connaissances et travaux réalisés a fait partie intégrante de mon travail au travers de conférences (universités, CLI), interviews, vulgarisations. En dehors des communications dans la presse quotidienne ou audio-visuelle, plusieurs articles de vulgarisation ont été rédigés dans des revues ou des livres (Adam-Guillermin *et al.*, 2010 ; Bailly du Bois, 1996, 2004b, 2007 ; Bailly du Bois *et al.*, 1995a ; Bailly du Bois *et al.*, 2013 ; Charmasson *et al.*, 2013 ; Guéguéniat *et al.*, 1993a ; Guéguéniat *et al.*, 1997a ; Lebaron-Jacobs *et al.*, 2009).

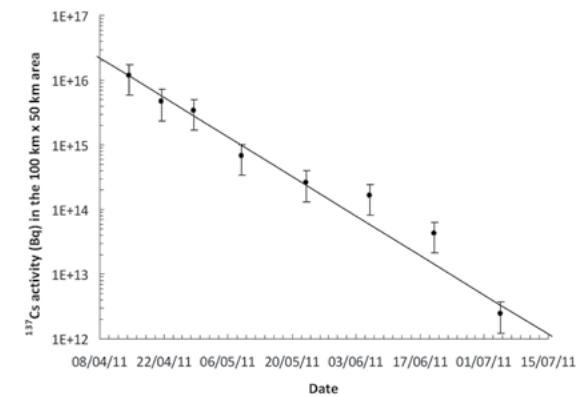


Figure 47. Évolution des quantités de ^{137}Cs présentes dans l'eau de mer.

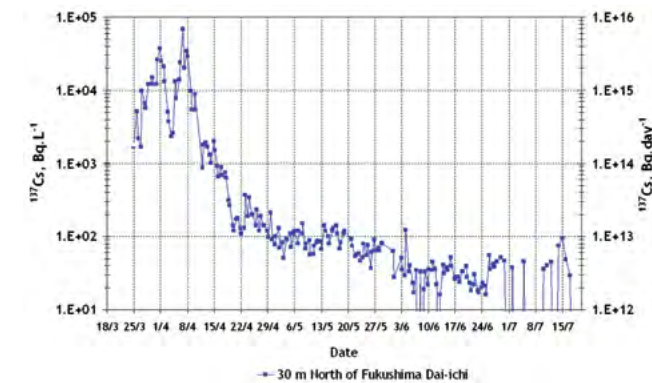


Figure 48. Évolution des concentrations à moins de 5 km de la centrale et flux de ^{137}Cs rejetés.

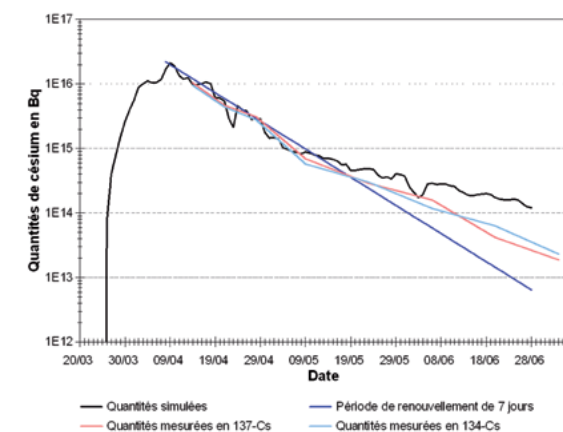


Figure 49 Comparaison des quantités de ^{137}Cs mesurées et simulées dans la zone de la centrale de Fukushima Dai-ichi.

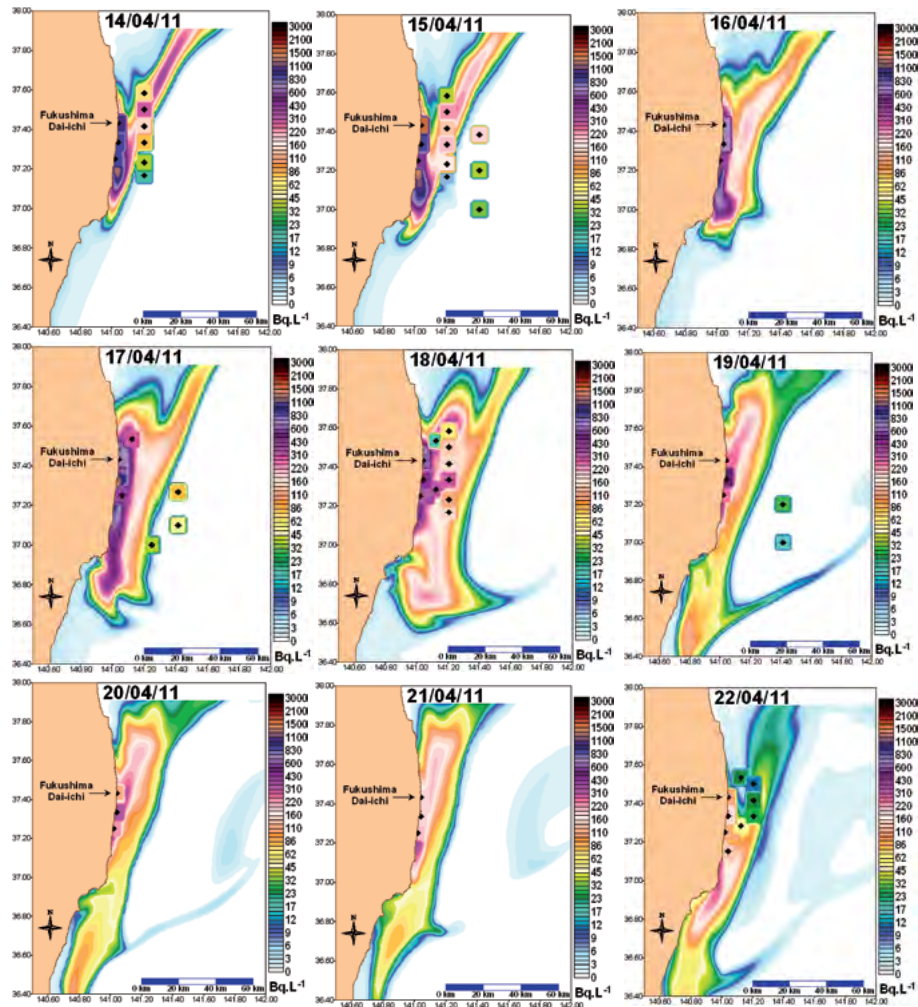


Figure 50. Concentrations mesurées et simulées jour par jour en ^{137}Cs du 14 au 22 avril 2011. Arrière-plan : simulation ; points dans des carrés de couleur : mesures.

CHAPITRE 7

Perspectives de projets scientifiques

L'utilisation civile de l'énergie nucléaire est jugée aussi bien sur ses performances techniques et économiques que sur la démonstration de son innocuité pour l'homme et l'environnement.

De ce point de vue, le milieu marin constitue un domaine sensible. Même si les concentrations mesurées sont faibles relativement aux concentrations naturelles, il est nécessaire de comprendre ces niveaux de concentration et de connaître l'impact des rejets. Au-delà de la simple dispersion, il faut mieux connaître les effets de piégeage, transport et relargage par les sédiments ou de bioaccumulation et élimination par les organismes.

Les avancées potentielles sont d'autant plus riches que la connaissance de la dispersion en solution est mature et que les outils développés sont robustes.

Tous les domaines présentés peuvent faire l'objet de nouveaux développements ; ils concernent l'amélioration des connaissances concernant la dispersion en solution, le transport sédimentaire et les transferts vers les espèces vivantes ou les particules. Les paragraphes qui suivent présentent les perspectives en fonction de ces trois approches mais elles ne s'excluent nullement. La synthèse entre ces différents domaines peut être réalisée entre autres par la construction de modèles intégrés.

Les paragraphes qui suivent ne présentent qu'une partie des thématiques envisageables et elles ne pourront pas toutes être abordées. L'imagination ne doit cependant pas être bridée et un sujet qui semble avoir peu de perspectives à un moment donné peut se retrouver plus tard au centre des préoccupations. Les discussions et échanges d'idées sont essentiels pour stimuler et concrétiser des sujets encore inaboutis.

7.1 Méthodes génériques

Lorsque l'on dispose de jeux de données importants, l'application de moyennes normalisées s'est montrée efficace pour caractériser certains phénomènes. Il s'agit par exemple de la comparaison de séries de mesures de radionucléides en les normalisant par rapport aux quantités rejetées, ou de comparaison de séries temporelles avec des signaux connus (saison, marée, température...).

Ce type de méthode ouvre des perspectives avec les moyens d'acquisition et de traitement actuels. Je pense en particulier à l'exploitation de données marégraphiques pour en extraire le signal météorologique ou la paramétrisation des transferts de radionucléides vers les espèces vivantes. La panoplie de données, moyens d'acquisition et de traitement disponibles autorise la résolution de systèmes avec contraintes qui ne sont pas encore explorés. L'ébauche qui a été réalisée concernant l'évaluation des flux entre la mer d'Irlande et la Manche peut par exemple être développée, mais cela peut également concerner les bilans de radionucléides au sein des sédiments ; des bilans d'énergie ou thermiques entre les modèles atmosphériques et marins, ou la confrontation entre la propagation de la marée simulée et mesurée pour en déduire les frottements sur le fond.

7.2 Meilleure connaissance de l'hydrodynamique

Les modèles hydrodynamiques mis en œuvre en Manche et mer du Nord ont démontré leur représentativité ; il reste néanmoins des questions ouvertes qui pourraient apporter des améliorations si des réponses étaient apportées. Ces actions peuvent être envisagées en poursuivant les collaborations avec l'[Ifremer](#)/DYNECO/PHYSED.

Une source importante d'incertitude concernant l'hydrodynamique provient de la « forme » du tuyau dans lequel s'écoule l'eau de mer. Cette forme est représentée par la bathymétrie, qui souffre encore d'imprécisions et d'inhomogénéité dans de nombreuses zones. Les améliorations à apporter dans ce domaine concernent en priorité des organismes comme le [SHOM](#).

7.2.1 Spatialisation du frottement sur le fond

En deuxième approche, la représentation insuffisante du frottement sur le fond peut expliquer les écarts entre la marée simulée et mesurée. Actuellement le coefficient pris en compte dans les modèles est uniforme sur tout le plateau continental, alors qu'il serait logique qu'il varie en fonction de la nature granulométrique du fond. De premiers tests ont montré que la paramétrisation spatiale de ce frottement n'était pas simple. Une piste pour progresser pourrait être la comparaison entre les isophases de la marée simulée et celle mesurée par les satellites du type TOPEX-Poséidon.

7.2.2 Frottement du vent sur la mer

La comparaison des flux de radionucléides mesurés et simulés indique que l'influence du vent est déterminante pour représenter la dispersion à moyen et long terme, et qu'elle est généralement sous-estimée. La formule proposée pour caler les modèles est empirique, elle sous-tend probablement plusieurs phénomènes imbriqués : effet des gradients de pression, état de la mer, représentation insuffisante de la dynamique du vent par les modèles. Il est envisagé de tester ces hypothèses à partir de mesures marégraphiques.

Les données marégraphiques acquises autour du cap de La Hague rendent possible la comparaison des influences météorologiques mesurées et simulées sur de longues séries de mesures. La situation du cap de La Hague est particulièrement intéressante de ce point de vue : la frontière hydrodynamique qu'elle représente vis-à-vis de la marée doit également être sensible vis-à-vis du forçage météorologique. Il est possible de réaliser une analyse différentielle des effets de périodes de vents de nord-est ou sud-ouest, qui sont les principales fréquences de vent observées. Les séries de données acquises durant plusieurs années enregistrent également l'effet du passage des cycles de basses et hautes pression. Une comparaison modèle/mesures basée sur la décomposition des différentes influences semble intéressante. Elle pourra intégrer les données acquises par d'autres marégraphes situés sur le plateau continental collectés au sein du réseau REFMAR. L'évaluation de l'effet

du vent peut également prendre en compte l'évolution des modèles météo pour comparer les frottements déduits des prévisions de vent.

Le stress calculé par les modèles météo peut également être testé. Le frottement du vent sur la mer doit se retrouver dans ces modèles au travers de la quantité de mouvement extraite de l'atmosphère. Le raffinement actuel des modèles marins et atmosphériques rend possible l'étude de ces couplages, *via* des échanges avec les équipes concernées à Météo-France.

7.2.3 Fluctuations du niveau moyen

Les levés marégraphiques peuvent aussi être valorisés pour établir précisément le référencement du niveau de la mer vis-à-vis du niveau moyen. Ce référencement est particulièrement délicat à établir dans la zone de La Hague où les écarts de marnage atteignent quatre mètres en quelques kilomètres. Les mesures acquises, encore partiellement exploitées, ont mis en évidence une variation dynamique du niveau moyen associée aux courants particulièrement intenses de cette zone. Il existe peu de régions dans le monde où cet effet soit mesurable et les premiers résultats obtenus posent de nouvelles questions : la baisse dynamique du niveau moyen semble deux fois plus élevée que celle attendue. Les travaux sur cette action peuvent intéresser les membres du réseau REFMAR.

7.2.4 Turbulence à l'échelle 1-100 mètres

Les mesures tridimensionnelles de radiotraceurs à proximité de l'émissaire [AREVA-NC](#) ont montré des fluctuations à court terme des concentrations qui pourraient résulter de structures tourbillonnaires de quelques dizaines de mètres. Ces données ouvrent la porte sur un domaine spatio-temporel peu exploré en mer ouverte, qui rejoint les observations de transport sur le fond acquises à l'aide du DYSPI. Une thématique de recherche peut s'ouvrir sur ces phénomènes de turbulence. Ils rejoignent des besoins de connaissance concernant la connaissance de la dispersion à petite échelle et à proximité des côtes. Les modèles utilisés actuellement doivent être adaptés pour prendre en compte ces mécanismes. Les contacts ont été pris avec Anne-Claire Bénis à l'[université de Caen](#) pour progresser dans ce domaine.

La représentation de la turbulence intéresse le transport sédimentaire, la dispersion à petite échelle (de 0 à 5 km d'un émissaire) et la tenue des structures immergées. Elle prend un relief particulier dans la perspective de construction d'hydroliennes dans les zones à forts courants.

7.2.5 La zone du cap de La Hague : un instrument pour l'étude de l'hydrodynamique

D'autres phénomènes singuliers ont été constatés dans la région du cap de La Hague, comme des fluctuations périodiques des courants mesurés que l'on pourrait assimiler à une mise en résonance des baies ouvertes avec les courants du raz Blanchard. Au travers des différentes questions posées dans les paragraphes précédents on constate que la zone atelier du cap de La Hague, déjà exceptionnelle pour tester des modèles de dispersion, autorise également l'étude de phénomènes hydrodynamiques inaccessibles ailleurs. Elle rassemble un volume de données disponibles en traceurs en deux et en trois dimensions et de mesures physiques, marégraphiques et courantologiques particulièrement riche. Il va encore s'étoffer dans les années à venir et cette zone ouvre des perspectives de recherches intéressantes pour la compréhension de l'hydrodynamique en mer ouverte.

7.3 Amélioration des modèles de dispersion

7.3.1 Paramétrisation automatique des modèles

Le travail de validation de modèles de dispersion réalisé en mer mégatidale a débuté la caractérisation des domaines d'application des modèles en fonction de leur résolution, du temps, de l'espace et des vitesses maximales rencontrées (§ 3.2.6). Ce travail peut se poursuivre afin d'améliorer la construction des outils, de simulation et d'évaluer leur précision en fonction des différentes échelles. Cette thématique peut faciliter la construction automatique d'outils de simulation adaptés aux besoins de chaque étude. Cette action peut être envisagée en collaboration avec l'équipe PREVIMER de l'[Ifremer](#).

7.3.2 Mer Celtique

La circulation des masses d'eaux dans le proche Atlantique, entre la mer d'Irlande, la mer Celtique et le golfe de Gascogne a été abordée au [paragraphe 2.6](#). Ces travaux n'ont fait qu'ébaucher des réponses avec les données disponibles en 2002. Une étude plus complète peut être menée à l'aide des mesures acquises depuis en Atlantique et dans le golfe de Gascogne. Des modèles tridimensionnels fonctionnent maintenant en routine sur cette emprise et ils autorisent des confrontations modèle/mesures plus poussées. Des travaux ont déjà été publiés par des équipes anglaises et irlandaises ; ils pourraient être complétés par les données de radiotraceurs qui sont irremplaçables pour évaluer la dynamique des masses d'eaux à moyenne et grande échelle.

Ces actions peuvent intéresser les équipes du [CEFAS](#) à Lowestoft et de l'[université de Galway](#).

7.3.3 Golfe de Gascogne

La validation des modèles de dispersion en Manche et mer du Nord a largement bénéficié des mesures de radiotraceurs solubles. Elle permet d'appliquer les modèles avec confiance dans les mers à faibles profondeurs et fortes marées comme la Manche et le sud de la mer du Nord. Dans le golfe de Gascogne les profondeurs, la proximité du talus continental et la moindre importance de la marée imposent la prise en compte de phénomènes tridimensionnels.

Le [tritium](#) rejeté par les centrales nucléaires peut être utilisé comme traceur de la dispersion dans ces zones, à condition de disposer de mesures du tritium à faible concentration. Les développements en cours à l'[IRSN](#) concernant la mesure par émanation de l'hélium 3 et le système de dégazage des échantillons développé au [LRC](#) rendent maintenant ces mesures accessibles en grand nombre.

Des tests de faisabilité ont été effectués lors des campagnes Aspex depuis 2009. Ils confirment qu'un signal en tritium issu des centrales nucléaires est exploitable à l'échelle du golfe de Gascogne. La validation des modèles dans cette zone à l'aide de traceurs solubles dont les flux sont connus est maintenant accessible en utilisant le tritium comme traceur des masses d'eaux à moyen et long terme. Un travail comparable à celui effectué en Manche - mer du Nord est réalisable. Une thématique de recherche sur ce sujet a été proposée, qui associe des équipes de l'[Ifremer](#), d'[EDF](#) et de l'[IRSN](#). Il reste à financer ce programme qui conditionne la validation de modèles utilisés en situation de rejets accidentels dans cette région.

7.3.4 Amélioration du modèle de courants résiduels

Le modèle de courants résiduels en coordonnées barycentriques mis en œuvre au [paragraphe 3.1](#) a été mis au point par Orbi et Salomon en 1988. Il répondait aux besoins de simulations à long terme avec des moyens de calcul réduits. L'évolution des moyens de calculs a rendu un tel outil moins incontournable. Il peut cependant rendre encore des services pour réaliser des simulations à long terme ou des tests répétitifs. La méthode comporte des imperfections à proximité des terres où elle calcule des courants sur la terre. J'ai proposé une méthode alternative à Jean-Claude Salomon en 1998. Elle n'a pas fait l'objet d'application faute de demande spécifique, mais elle peut toujours être mise en œuvre et testée.

7.4 Transferts vers les compartiments biologiques et sédimentaires

Une des principales voies de transfert des radionucléides à l'homme est l'ingestion de produits contaminés. La connaissance et la prévision des concentrations au sein des espèces vivantes est une priorité pour la radioprotection.

Le comportement des radionucléides en solution étant bien connu, il est possible de simuler les transferts et les concentrations au sein des espèces vivantes et des sédiments. Cela suppose de définir des coefficients et des cinétiques de transfert représentatifs. La faisabilité et l'efficacité de la démarche a été démontrée pour quelques espèces et radionucléides (Fiévet *et al.*, 2013 ; Fiévet *et al.*, 2006). Cette approche peut être étendue de manière à fournir *a minima* des estimations enveloppes des concentrations au sein des espèces vivantes consommées.

Les axes de recherches envisagés s'inscrivent dans la continuité des travaux déjà réalisés : ils utilisent les mesures de radiotraceurs comme outils de validation des processus de transfert dans l'environnement.

Cette action est programmée dans le cadre de l'[ANR AMORAD](#) qui vient d'être acceptée. Elle s'appuiera sur la base de données de mesures de suivi de radionucléides en Manche acquise par l'[IRSN](#) depuis trente années, en y associant de nouvelles mesures. Elle sera pilotée par Bruno [Fiévet au LRC](#) ; j'y apporterai mon soutien pour la partie modélisation.

7.5 Transport sédimentaire

Une part significative des radionucléides artificiels introduits en mer est associée aux particules sédimentaires qui se déposent au fond. Ces particules peuvent être mobilisées et déplacées avec les courants de marée et de houles avec des trajectoires et des vitesses mal connues. Ici encore les radiotraceurs sont des outils de choix pour mettre en évidence les processus de transport à long terme.

Les travaux antérieurs ont rassemblé tous les outils pour améliorer la connaissance du transport sédimentaire en Manche (modèle, méthodes, instrument DYSPI, mesures de radionucléides). Un travail d'investigation et de validation comparable à ce qui a été réalisé avec les radiotraceurs concernant le transport soluble peut être abordé.

Cette action est également programmée dans le cadre de l'ANR AMORAD (2014-2020), avec le pilotage de Philippe Laguionie. La collaboration avec le M2C à l'université de Rouen doit se poursuivre dans ce domaine, en association avec l'Ifremer/DYNECO/PHYSED. Ce domaine est très vaste et je pense pouvoir y apporter mon soutien avec plusieurs pistes en perspective :

- la recherche de critères génériques permettant d'associer des typologies granulométriques correspondants aux différents faciès sédimentaires rencontrés ;
- le test et la validation du déplacement par charriage des différentes classes de particules simulées, en s'appuyant sur la distribution spatiale des concentrations en radionucléides dans les sédiments déposés ;
- l'exploration des mécanismes déterminants pour le dépôt et la remise en suspension des particules dans des substrats grossiers, en particulier les effets des instabilités turbulentes près du fond ;
- la caractérisation du comportement du stock de particules mobiles qui détermine l'enregistrement du signal en radiotraceurs dans les dépôts de sédiments fins (Rade de Cherbourg, golfe normand-breton) ;
- la confirmation et la publication de la pénétration des particules marquées en profondeur dans des substrats grossiers ;
- l'évaluation des quantités de radionucléides déposés et mobilisables au sein des différents faciès sédimentaires en Manche ;
- la simulation du devenir des radionucléides fixés sur les particules sédimentaires en Manche et leur conséquence pour les transferts vers les espèces vivantes. Les mesures disponibles de ^{106}Ru , ^{60}Co et ^{137}Cs sont des traceurs complémentaires pour évaluer la représentativité des modèles.

7.6 Outils pour la crise marine

L'état de l'art en modélisation du devenir des radionucléides dans l'environnement marin permet d'envisager la simulation de la dispersion des substances en solution dans l'eau de mer depuis l'heure suivant un rejet, jusqu'à plusieurs années en Manche et mer du Nord et pour des conditions réalistes de rejet, de marée et de météorologie. Ces fonctionnalités sont appliquées pour réaliser des recherches, mais les expériences passées ont montré que ces outils peuvent également fournir des réponses dans des situations d'urgence, lors d'accidents maritimes. Les deux approches ne s'excluent pas *a priori*, mais les spécificités requises pour mettre en œuvre des outils opérationnels utilisables à tout moment les distinguent des outils de recherche. Il faut néanmoins conserver dans les outils opérationnels un lien actif avec les travaux de recherche, de manière à garder vivante l'expertise qui les a construits et pour s'assurer que les hypothèses et simplifications réalisées maintiennent les résultats compatibles avec les objectifs recherchés.

Plusieurs options sont envisageables pour simuler la dispersion de substances dissoutes en situation accidentelle. Un certain nombre de choix et d'actions ont été réalisés *a minima* pour assurer une réponse en situation d'urgence. Les méthodes applicables et les développements réalisés peuvent faire l'objet de réflexions et de tests pour s'adapter au mieux aux objectifs et contraintes.

7.6.1 Prévision actualisée de l'état radiologique du milieu marin

La capacité croissante des modèles à simuler des paramètres mesurables, comme des concentrations en radionucléides dans différentes matrices, rend possible l'amélioration des connaissances sur les fonctions de transfert vers ces matrices.

De nombreuses mesures effectuées pour la surveillance du milieu marin sont réalisées le long des côtes et à proximité des installations nucléaires. Ces mesures sont limitées pour des raisons pratiques à des fréquences et des localisations discrètes. L'interprétation de ces mesures implique de connaître les concentrations attendues pour les rejets industriels déclarés.

Les modèles de dispersion permettent de simuler la dispersion des rejets déclarés pour n'importe quel lieu et date. Les modules de transfert associés permettent de calculer les concentrations correspondantes au sein des différentes matrices. Ces outils peuvent constituer des instruments d'appréciation des mesures et, dans la mesure où ils reproduisent bien ces valeurs, compléter la couverture spatiale et temporelle d'un réseau de surveillance.

Il est possible d'aller plus loin en associant aux modèles de transfert la connaissance spatialisées de la biomasse et des substrats sédimentaires existants ([chapitre 4](#)). Il devient alors possible d'estimer les flux de radionucléides au sein des différents compartiments. Des contraintes pour calibrer ces flux sont déjà fournies par les mesures dans l'eau de mer telles que décrites au [paragraphe 2.5](#).

Un tel outil, utilisable aussi bien pour la recherche que pour l'expertise, permettrait une évaluation globale des flux et des bilans de polluants radioactifs en milieu marin.

Cette action intéresse les équipes de l'IRSN chargées de la surveillance ; elles peuvent également intéresser les équipes de l'Ifremer concernées par la modélisation intégrée de l'écosystème marin.

7.7 Échanges mer-atmosphère

Si l'on dispose d'un traceur susceptible de marquer les échanges entre la mer et l'atmosphère et que l'on est capable de simuler sa dispersion, il devient possible d'étudier les échanges entre ces deux milieux. Ce travail a été initié dans le cadre d'un projet d'ingénieur (Bacon *et al.*, 2011). Il utilise comme traceur de la vapeur d'eau, le tritium HTO ; l'automate de prélèvement mis au point dans le cadre du projet Disver et un déshumidificateur couplé à cet automate pour prélever la vapeur d'eau de l'air. Un suivi séquentiel a été réalisé durant 12 jours avec un prélèvement toutes les 10 minutes. Cette étude préliminaire a mis clairement en évidence le marquage atmosphérique en tritium atmosphérique associé aux panaches marins de radionucléides transitant au vent du lieu de mesure.

Ces tests ont démontré qu'un couplage entre les modèles de dispersion marine et les outils de dispersion atmosphérique pouvait être contraint par des mesures, d'autant plus facilement que les équipes concernées travaillent dans le même laboratoire. Les travaux sur ce sujet sont encore peu développés et il y a là une thématique intéressante à explorer pour mieux connaître les échanges de polluants entre la mer, l'atmosphère et le milieu terrestre. D'autres traceurs complémentaires du tritium peuvent être utilisés pour suivre différents types de particules (^{106}Ru , ^{60}Co , ^{137}Cs , Pu).

CHAPITRE 8 Conclusion

Mon parcours m'a permis de mettre en œuvre une vision globale des études de dispersion en mer ; elle associe de manière complémentaire la conceptualisation, les actions de terrain, l'exploitation et l'application des résultats.

L'utilisation des radiotraceurs solubles a précisé le cheminement des masses d'eaux sur le plateau continental du nord-ouest de l'Europe. Des bilans des flux de polluants radioactifs ont établis à l'échelle de la Manche et de la mer du Nord. Ils ont mis en évidence les temps de transit, les flux des masses d'eaux et le comportement plus ou moins soluble des différents radionucléides dans l'eau de mer.

Ces résultats intégrés et la capacité des radiotraceurs à quantifier la dispersion à court, moyen et long terme, en ont fait des outils de choix pour la validation des modèles hydrodynamiques de dispersion. Cette validation a pu s'appuyer sur

des mesures *in situ* adaptées depuis l'échelle des minutes et des mètres suivant un rejet, jusqu'à l'échelle des années, de la mer Celtique à la mer de Norvège. Une validation comparable est envisageable dans le golfe de Gascogne en s'appuyant sur des mesures du tritium rejeté par les centrales nucléaires. Par ailleurs, la zone atelier du cap de La Hague garde un fort potentiel pour tester et améliorer la connaissance de l'hydrodynamique en mer mégatidale.

La connaissance du transport et de la dispersion en solution rend possible la simulation des transferts de polluants depuis l'eau de mer vers les espèces vivantes et les sédiments. Les concentrations calculées ainsi dans les différentes matrices reproduisent bien les marquages mesurés. La porte est ouverte pour la construction de modèles intégrés simulant la dispersion, les transferts et les flux de radionucléides entre les différents compartiments de l'écosystème marin.

Des modèles hydrodynamiques validés et des traceurs associés aux particules sédimentaires dont les termes sources sont connus permettent également de tester et contraindre des modèles de transport sédimentaire. Plusieurs outils ont été construits pour progresser dans ce domaine : conditions aux limites des modèles, modèle de transport adapté à la Manche, instrument d'observation *in situ*, caractérisation de traceurs et de méthodes de collecte d'échantillons. Plusieurs pistes sont envisagées pour approfondir cette thématique.

Les thématiques ouvertes sont d'autant plus riches que les recherches concernant la dispersion ont atteint leur maturité et que les outils développés sont robustes. Les approches présentées ne s'excluent pas ; il conviendra de définir pour chacune d'elle des priorités en maintenant autant que possible des synergies entre les actions. Les recherches continueront à s'appuyer solidement sur les mesures *in situ*, en particulier celles de radiotraceurs qui restent des outils océanographiques exceptionnels. Les choix retenus garderont toujours en perspective l'application des résultats ou des connaissances à d'autres substances ou domaines qui incluent les interfaces avec les milieux atmosphériques et continentaux.

CHAPITRE 9 Présentation personnelle

9.1 *Curriculum vitae*

Bailly du Bois Pascal

Né le 06 février 1962 à Paris 14^e

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)

Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville (IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRC)

Rue Max Pol Fouchet

BP 10

50130 Cherbourg-Octeville, France

Tél : +33 (0)2 33 01 41 05

pascal.bailly-du-bois@irsn.fr

Fonctions actuelles

- Ingénieur de recherche ;
- Expert confirmé concernant la dispersion des radionucléides et la modélisation en milieu marin pour l'IRSN.

Résumé de la fonction

Les travaux ont porté principalement sur la mesure et la connaissance de la dispersion des radionucléides solubles dans l'eau de mer et la caractérisation du déplacement des masses d'eaux sur le plateau continental européen. Ces données ont permis de développer et valider des modèles hydrodynamiques de dispersion et de transfert en milieu marin. Tous les domaines nécessaires à la réalisation de ces objectifs ont été abordés, depuis la mise au point de techniques de prélèvement et de mesure jusqu'aux méthodes et paramètres appliqués pour la modélisation numérique de l'hydrodynamique maritime.

Mots clés : radioécologie, océanographie, radionucléides, traceurs, modélisation, hydrodynamique, dispersion, transferts, transport sédimentaire, instrumentation, ¹²⁵Sb, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ³H, ¹⁰⁶Ru, ⁶⁰Co, Manche, mer du Nord, Atlantique, mer Celtique, Fukushima.

Parcours professionnel

- Centre national pour l'exploration océanographique (CNEXO), station biologique de Roscoff. « Étude de l'expansion de l'algue *Sargassum muticum* sur les côtes françaises » (Bailly du Bois, 1984 ; Belsher *et al.*, 1984), (1984).
- Service maritime de la ville de Marseille. « Bilan des transports entre les îles et le continent en France métropolitaine », proposition de loi (Bailly du Bois, 1985), (1985).
- Conseil général du Finistère. « Bilan et valorisation des terrains côtiers acquis au titre de la taxe des espaces verts » (Bailly du Bois, 1986), (1986).
- Fondation pour l'éducation à l'environnement en Europe (FEEE). Mise en place du label de qualité pour les plages et les ports « Pavillon bleu d'Europe », (1987).
- Compagnie générale des matières nucléaires (COGEMA). Mis à la disposition du Laboratoire de radioécologie marine de l'IPSN (1988-1989).
- Ingénieur de recherche au Laboratoire de radioécologie marine de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN), IRSN depuis 2002, actuellement [Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville](#) de l'IRSN (1990-2012).
- Expert de l'IRSN concernant la dispersion des radionucléides et la modélisation en mer (2010-2013, IRSN, Cherbourg-Octeville).
- Expert confirmé de l'IRSN concernant la dispersion des radionucléides et la modélisation en mer (2013-2017, IRSN, Cherbourg-Octeville).

Formation initiale

- Diplôme d'études approfondies de sciences humaines et juridiques de la mer, université de Nantes, 1986.
- Maîtrise de sciences et techniques de protection de l'environnement, université de Jussieu Paris VII, 1985.

Avant la radioécologie

La formation pluridisciplinaire en environnement que j'ai suivie a concerné les principales disciplines scientifiques de l'écologie (chimie, physique, biologie, sciences de la Terre), avec en parallèle des approches en sciences humaines (droit de l'environnement, géographie, sociologie, épistémologie). J'avais comme principales motivations le besoin de travailler sur le terrain, en milieu marin, avec la perspective de voir l'utilité sociale des travaux réalisés. Lors de cette formation, j'ai travaillé au CNEXO (actuel Ifremer), où j'ai pu me familiariser avec le travail sur du matériel biologique (*Sargassum muticum*) et la rédaction scientifique (Belsher *et al.*, 1984). Les stages et missions que j'ai ensuite effectués au Service maritime de la ville de Marseille, au Conseil général du Finistère et à la Fondation pour l'éducation à l'environnement en Europe ont concerné l'organisation, la gestion et la préservation des ressources littorales. Ces expériences m'ont permis d'appréhender les enjeux sociaux-économiques liés à l'exploitation du milieu marin. J'ai eu l'occasion de faire connaissance avec les principaux acteurs concernés : scientifiques, élus, gestionnaires administratifs, entreprises, associations.

J'ai été recruté en 1988 en CDD au Laboratoire de radioécologie marine de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (CEA/IPSN/DERS/SERE/LRM) pour travailler en tant que chimiste sur la complexation des radionucléides rejetés par l'usine COGEMA-La Hague. Embauché en CDI en 1990, ma carrière s'est poursuivie dans cette unité qui a évolué pour devenir successivement le Laboratoire d'études radioécologiques de la façade Atlantique (LERFA), puis le Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville au sein de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN/PRP-ENV/SERIS/LRC). Une des motivations de mon recrutement était la participation aux campagnes océanographiques de mesure de la radioactivité dissoute réalisées par le laboratoire. Il m'est apparu rapidement que les données obtenues durant ces campagnes étaient particulièrement intéressantes comme traceurs des processus environnementaux. L'organisation et la participation aux campagnes, la mise en forme, l'exploitation des résultats et leur valorisation scientifique ont mis au second plan les recherches sur les complexes organiques. Ces premiers travaux m'ont néanmoins convaincu de l'importance de la connaissance

des termes sources pour évaluer le devenir physico-chimique des polluants rejetés. Cette connaissance a rendu possible l'adaptation des techniques de pré-concentration mises en œuvre *in situ* afin de suivre l'évolution physico-chimique des radionucléides rejetés dans l'eau de mer.

Ce préambule souligne le caractère pluridisciplinaire de ma formation et des domaines que j'étais prêt à aborder. Si, dans la suite de mon parcours, je me suis plutôt orienté vers la dispersion des radionucléides dans l'eau de mer, j'ai toujours eu un regard attentif sur les autres disciplines. Lorsqu'un sujet nécessitait une attention particulière, mon bagage initial m'a permis de m'adapter au domaine concerné.

Activités de recherche réalisées à l'IPSN (1988-2002), puis à l'IRSN (2002-2012)

Spéciation des radionucléides dans l'eau de mer

- Mise en évidence et quantification des formes complexes des radionucléides dans les effluents de l'usine AREVA-NC (^{125}Sb , ^{106}Ru , ^{60}Co), (1988-1989).
- Amélioration de la métrologie des radionucléides dissous (Gandon *et al.*, 1998), (1989-1992).

Connaissance de la dispersion des radionucléides dans l'eau de mer

Réf. : (Bailly du Bois, 1995, 1996, 1997, 1998, 2008a ; Bailly du Bois *et al.*, 1998 ; Bailly du Bois and Guéguéniat, 1999 ; Bailly du Bois *et al.*, 1995a ; Bailly du Bois *et al.*, 1991 ; Bailly du Bois *et al.*, 1993 ; Bailly du Bois *et al.*, 1999 ; Bailly du Bois and Rancillac, 1998 ; Bailly du Bois *et al.*, 1997 ; Bailly du Bois *et al.*, 1995b ; Germain *et al.*, 1999 ; Guéguéniat and Bailly du Bois, 1994, 1996 ; Guéguéniat *et al.*, 1994 ; Guéguéniat *et al.*, 1995b ; Guéguéniat *et al.*, 1995c ; Guéguéniat *et al.*, 1993a ; Guéguéniat *et al.*, 1997a ; Herrmann *et al.*, 1995 ; Lebaron-Jacobs *et al.*, 2009 ; Masson *et al.*, 2009 ; Masson *et al.*, 2005 ; Povinec *et al.*, 2003 ; Smith *et al.*, 2002, 2004).

- Campagnes océanographiques en Manche, mer du Nord et en Atlantique sur des navires français et étrangers : organisation, préparation, chef de mission (environ 80 campagnes côtières et hauturières, plus de 10 000 prélèvements de 120 L pour la mesure de radionucléides émetteurs gamma, plus de 40 000 pour la mesure du tritium HTO), prélèvements de sédiments par bennes et carottiers, (1988-2012).
- Synthèse des mesures de radionucléides en solution dans l'eau de mer, cartographie, connaissance qualitative et quantitative de la répartition et des flux de radionucléides dissous en Manche et mer du Nord, (1988-1998).

- Étude de la dispersion des radionucléides solubles dans l'Atlantique du nord-est (mer Celtique, mer d'Irlande, golfe de Gascogne), et dans le Pacifique nord-ouest, (1998-2012).

Évaluation de l'impact des rejets industriels de radionucléides en mer

- Évaluation à partir des mesures *in situ* du cheminement, de la dilution et des temps de transit des rejets liquides, (1989-2012) :
 - de l'usine AREVA-NC à l'échelle du plateau continental du nord-ouest de l'Europe (Bailly du Bois, 1995, 1997, 2008a ; Bailly du Bois *et al.*, 1998 ; Bailly du Bois *et al.*, 2002 ; Bailly du Bois and Guéguéniat, 1999 ; Bailly du Bois *et al.*, 1991 ; Bailly du Bois *et al.*, 1999 ; Bailly du Bois and Rancillac, 1998 ; Bailly du Bois *et al.*, 1995b ; Germain *et al.*, 1999 ; Guéguéniat *et al.*, 1995a ; Guéguéniat *et al.*, 1997b) ;
 - de l'usine de Sellafield en mer Celtique et en Manche (Bailly du Bois *et al.*, 2002 ; Bailly du Bois and Guéguéniat, 1999 ; Garreau and Bailly du Bois, 1997 ; Hunt *et al.*, 2002).
- Membre du GT3 du Groupe radioécologie Nord-Cotentin (Calmet *et al.*, 2000 ; GRNC : Groupe radioécologie Nord-Cotentin *et al.*, 1999), (1997-1999) :
 - établissement des facteurs de dilution des rejets de l'usine AREVA-NC ;
 - définition de la méthodologie de comparaison modèle/mesure ;
 - confrontation modèle/mesure pour l'ensemble des mesures de radioactivité disponibles dans l'environnement marin du Nord-Cotentin de 1963 à 1997, évaluation statistique et synthèse des résultats.

Modélisation de la dispersion de substances solubles en Manche et mer du Nord (collaboration IRSN/Ifremer)

Validation de modèles hydrodynamiques à l'échelle de la Manche et de la mer du Nord par des mesures *in situ* (Bailly du Bois, 2001, 2002, 2003, 2004b, 2005c, 2007 ; Bailly du Bois *et al.*, 2001 ; Bailly du Bois and Dumas, 2002, 2003, 2004b, c, 2005a, b ; Bailly du Bois and Rancillac, 1998 ; Ryan *et al.*, 2001a, b, c ; Salomon *et al.*, 1997), (1996-2002).

Modélisation des transferts de radionucléides en mer

- Développement et validation de modèles de transfert vers les espèces vivantes et les sédiments (Bailly du Bois, 2003, 2005c ; Bailly du Bois and Dumas, 2004c, 2005b ; Bailly du Bois *et al.*, 2005 ; Fiévet *et al.*, 2006), (1998-2002).
- Création et renseignement de bases de données descriptives de l'environnement (espèces vivantes, sédiments, bathymétrie, météorologie (Ozouf, 2000 ; Struski, 1999), (1998-2012).

Modélisation de la dispersion en deux dimensions dans le champ proche d'un émissaire marin (projet DISPRO, collaboration IRSN/Ifremer)

Développement et validation de modèles de dispersion dans le champ proche d'un émissaire de rejet (Bailly du Bois, 2004a, 2005b, a, 2006 ; Bailly du Bois and Dumas, 2004b, a, 2010b, c ; Bailly du Bois *et al.*, 2010b, 2012c ; Dumas *et al.*, 2011), (2002-2007).

Modélisation de la dispersion en trois dimensions dans le champ proche d'un émissaire marin (projet DISVER, collaboration IRSN/Ifremer)

- Mesure tridimensionnelle à haute fréquence de la dispersion des rejets d'un émissaire marin (Bailly du Bois and Dumas, 2010a), (2008-2011).
- Développement et validation de modèles de dispersion verticale en trois dimensions, (2010-2012).

Transport des radionucléides fixés sur les particules sédimentaires en Manche (collaboration IRSN/Ifremer/M2C)

- Traitement et cartographie de données sédimentaires pour leur exploitation par les modèles numériques (Bailly du Bois, 2000), (1999-2002).
- Encadrement de recherches concernant la modélisation du transport sédimentaire (deux post-doctorats, une thèse) (Blanpain, 2009 ; Cugier, 2000 ; Olivier, 2004), (1999-2010).
- Développement et mise au point d'un instrument d'observation et de mesure *in situ* des transports sédimentaires (système DYSPI) (Bailly du Bois *et al.*, 2010a ; Blanpain, 2009 ; Blanpain *et al.*, 2007 ; Blanpain *et al.*, 2009), (2005-2007).

Transfert du tritium HTO entre l'eau et l'atmosphère

Caractérisation des transferts associés à la dispersion du panache des rejets liquides de l'usine AREVA-NC (Bacon *et al.*, 2011), (2009-2010).

Mises au point métrologiques, techniques et méthodologiques pour la validation de modèles de dispersion à l'aide des radiotraceurs

- Amélioration des techniques de mesure des radionucléides émetteurs gamma dans l'eau de mer (Gandon *et al.*, 1998), (1995-1999).
- Optimisation de la métrologie du tritium par scintillation liquide (Bailly du Bois, 2005a), (2002).
- Développement d'un automate de prélèvement polyvalent (Bailly du Bois, 2008b), (2008).
- Système de prélèvement dynamique à haute fréquence et à plusieurs profondeurs (DYNALIST, (Bailly du Bois, 2009 ; Bailly du Bois and Pouderoux, 2012b, a ;

- Mise au point d'algorithmes pour la génération automatique de modèles numériques de terrain et de nouvelles emprises de modèles (Bailly du Bois, 2011), (2004-2010).
- Construction d'un banc de dégazage pour la métrologie du tritium par émanation de l'hélium 3 (Desplats, 2012a, b), (2012).

Évaluation de l'impact des rejets marins suite à l'accident de Fukushima

- Participation à la cellule mer de l'IRSN, caractérisation du terme source marin et de la cinétique de dispersion des rejets accidentels dans le Pacifique du Nord-Ouest (Bailly du Bois *et al.*, 2012a ; Bailly du Bois *et al.*, 2012d ; Bailly du Bois *et al.*, 2012e ; Laguionie *et al.*, 2012a ; Laguionie *et al.*, 2012b), (2011).
- Comparaison modèle/mesures et calibration d'un modèle hydrodynamique représentatif de la dispersion des substances solubles (collaboration IRSN/Ifremer, (Bailly du Bois *et al.*, 2012b ; Bailly du Bois *et al.*, [submitted-a] ; Bailly du Bois *et al.*, 2012f), (2012).

Travaux en projet

ANR AMORAD : validation de modèles de dispersion en milieu marin, (2013-2023)

- transport sédimentaire en Manche ;
- modélisation des transferts de radionucléides aux espèces vivantes.

Contrat AREVA, (2014-2017)

- dispersion, transfert et transport sédimentaire des radionucléides rejetés par AREVA-NC dans le golfe normand-breton ;
- mesure et simulation de la dispersion de rejets à la côte.

À programmer

Validation du modèle Ifremer-MARS3D dans le golfe de Gascogne à l'aide de mesures de radiotraceurs solubles.

Activités d'enseignement et d'encadrement

Enseignement

- CNAM, Institut des sciences et techniques de la mer : les radionucléides artificiels en milieu marin, utilisation des radiotraceurs en océanographie (2002-2013).
- Université de Rouen, Maîtrise de sciences et techniques en environnement : les radionucléides en milieu marin : origines, flux, traceurs, modélisation de la dispersion (2002-2004).

Encadrement de stages

Encadrement de 12 stagiaires M1 ou M2 de 4 à 6 mois chacun, (1990-2013).

Tuteur de thèse

Blanpain O. (2005-2009) : « Dynamique sédimentaire multiclasse : de l'étude des processus à la modélisation en Manche » (Blanpain, 2009).

Encadrement de thèses

Douez E. (1991-1992) : « Contribution à l'étude de l'hydrodynamisme du littoral nord Pas-De-Calais » (Douez, 1993).

Encadrement de post-doctorants

- Cugier P. (2000) : « Développement d'un modèle numérique multicouche hétérométrique pour la simulation du transport sédimentaire en Manche ; caractérisation des principaux processus » (Cugier, 2000) ;
- Olivier C. (2004) : « Développement d'un modèle numérique multicouche hétérométrique pour la simulation du transport sédimentaire en Manche ; détermination de l'équation de transport par des mesures en canal de laboratoire », (Olivier, 2004).

Tuteur ingénieur en formation par alternance

Bacon G. (2008-2010) : « Étude de la dispersion des radionucléides en milieu marin et atmosphérique », « Transfert entre l'eau et l'atmosphère d'un rejet marin de tritium (HTO) en zone côtière » (Bacon, 2010 ; Bacon *et al.*, 2011).

Autres activités

Rayonnement et attractivité académiques

Participation à des programmes européens

- Programmes MAST « FLUXMANCHE I » et « FLUXMANCHE II » : « Quantification des flux de matière transitant en Manche », (1990-1997).
- Programme MAST : « Utilisation des marqueurs radioactifs pour la validation des modèles numériques hydrodynamiques en mer du Nord », (1991-1993).
- Programme Interreg II : « Hydrologie de l'Atlantique et radiotraceurs, mise en réseau et modélisation » (Ryan *et al.*, 2001a, b, c), (2000-2001).

Principales collaborations hors IRSN

- Université de Lille, chimie analytique et marine, (1988-2000).
- Universités de Caen – Rouen, UMR M2C, (1988-2013).

- CNAM/INTECHMER, Cherbourg, (1988-2013).
- CNRS – station biologique de Roscoff, (1988-2013).
- Ifremer – DYNECO/PHYSED, (1988-2013).
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hambourg, Allemagne), (1990-1996).
- Centre for Environment, Fisheries & Aquaculture Science (Lowestoft, Royaume-Uni), (1990-2013).
- Radiological Protection Institute of Ireland (Dublin, Irlande), (1998-2013).
- Ifremer - DYNECO/BENTHOS, (2001-2013).
- Ifremer - Port en Bessin, (2005-2013).
- Japan Atomic Energy Agency (Japon, Tokyo), (2008-2013).

Comité scientifique de colloque

« Journées nationales génie civil - génie côtier », Cherbourg-Octeville, 2012.

Reviewer pour les revues

- Biogeosciences
- Computers & Geosciences
- Journal of Environmental Radioactivity
- Journal of Geophysical Research–Oceans
- Journal of Marine Systems
- Oceanologica Acta
- Science of the Total Environment

Formations concernant la dispersion en mer des rejets des installations nucléaires

- Autorité de sûreté, Égypte (Herer *et al.*, 2012), 2010.
- Exploitant STEG, Tunisie, 2011.
- Autorité de sûreté VARANS, Vietnam, 2013.

Organisation et vie de l'entité

Animation scientifique

Coordination des actions de modélisation du Services d'études et recherches sur les milieux naturels (IPSN/SERNAT).

Communication

- Universités, bar des sciences, Commissions locales d'information : conférences concernant la dispersion des radionucléides en mer et leur utilisation en océanographie.
- Interventions régulières dans les médias (presse, radio, télévision).

Interactions avec l'environnement social, économique et culturel

Principaux rapports d'études et d'expertise destinés à des décideurs publics ou privés

- Ville de Marseille

Bailly du Bois, P. Bilan des transports entre les îles et le continent en France métropolitaine, proposition de loi. Rapport MST2, université Jussieu Paris VII. 30 p. (Bailly du Bois, 1985), 1985.

- Commissariat à l'énergie atomique

Bailly du Bois, P. Radioécologie marine, *in* rapport Haut-commissaire du CEA, 16 p. (Bailly du Bois, 1995), 1995.

- Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

Bailly du Bois, P., Rancillac, F. Dispersion en milieu marin, *in* rapport Comité scientifique de l'IPSN, Document « C » 16 juin 1998, 35 p., (Bailly du Bois and Rancillac, 1998), 1998.

Bailly du Bois P., Crabol B., Germain P., Calmet D. Dispersion des produits chimiques susceptibles d'être émis dans l'environnement suite au naufrage du « levoli Sun », rapport IRSN/DPRE/SERNAT/2001-14, 23 p., (Bailly du Bois *et al.*, 2001), 2001.

Bailly du Bois P. TRANSMER, modèle de simulation des transferts de radionucléides en milieu marin : choix des options, architecture, validation et fonctionnalités, rapport IRSN/DPRE/SERNAT/2003-04, 188 p., (Bailly du Bois, 2003), 2003.

Bailly du Bois, P., Germain, P., Connan, O., Maro, D., Masson, M. Conséquences environnementales du naufrage de l'ECE, dispersion et concentrations dans l'eau de mer de métaux lourds suite au largage d'acide phosphorique à partir du 31 août 2006, *in* rapport IRSN/DEI/SECRE 2006-35, 15 p., (Bailly du Bois, 1997), 2006.

Bailly du Bois P., Boyer P., Duffa C. Étude préliminaire pour un outil de gestion de crise radiologique dans les zones marines de France métropolitaine, rapport IRSN/DEI/SECRE/2008-57, 34 p., (Bailly du Bois *et al.*, 2008), 2008.

- Programmes européens

Bailly du Bois P. Quantitative assessment of dissolved radiotracers in the English Channel: sources, average impact of la Hague reprocessing plant and conservative behaviour (1983, 1986, 1988 and 1994), FLUXManche II Final Report - MAST II

MAS2CT940089 "Hydrodynamics and biogeochemical processes and fluxes in the Channel" Section 5, Task R, "Identification of Sediment Processes and Measurements of Water Fluxes using Radiotracers" coordinator: P. Guéguénat, A:74-86, (Bailly du Bois, 1997), 1997.

Ryan T., Sequeira S., Bailly du Bois P., Nolan G. Atlantic Modelling and Radionuclide Tracer Network, final report, EEC Interreg2 project EA-B1IRE-No. 2.13, 23 p., (Ryan *et al.*, 2001a), 2001.

- AREVA-NC

Bailly du Bois, P. Qualification du modèle de dispersion dans le champ proche de l'émissaire de rejet en mer de l'établissement COGEMA La Hague, DisPro V.1., *in* rapport IRSN/DEI/SECRE, 2005-59, 66 p., (Bailly du Bois, 2005a), 2005.

Bailly du Bois, P. Qualification du modèle de dispersion dans le champ proche de l'émissaire de rejet en mer de l'établissement AREVA-NC La Hague, mise à jour DISPRO V.2., *in* rapport IRSN/DEI/SECRE, 2006-46, 26 p., (Bailly du Bois, 2006), 2006.

Bailly du Bois, P. Mise au point d'un système de prélèvement pour la validation de modèles de dispersion marine en trois dimensions (projet DISVER), *in* rapport IRSN/DEI/SECRE, 2008-53, 37 p., (Bailly du Bois, 2008b, 2009), 2008.

Modèles pour l'aide à la décision

Simulation du devenir de rejets accidentels en mer

- Simulations lors d'accidents réels ou simulés (Bailly du Bois, 2001 ; Bailly du Bois *et al.*, 2001), (2000-2007).
- Mise en place d'une architecture de simulation (Bailly du Bois, 2003, 2004a), (2001-2013).
- Initiation du projet STERNE (Simulation de crise du transport d'éléments radioactifs en environnement marin) (Bailly du Bois *et al.*, 2008), (2007-2013).

Principaux travaux contractuels

- **AREVA-NC** : mesure et simulation du devenir des rejets liquides de l'usine de La Hague, (1988-2013).
- **Région Basse-Normandie** : mesure et de la simulation de la dispersion en trois dimensions proximité d'un émissaire marin, (2008-2009).
- Guinard énergies : calculs courantologiques pour évaluer le gisement d'énergie exploitable par des hydroliennes dans le Raz Blanchard, (2010).
- Formations pour les exploitants et les autorités de sûreté étrangères, (2010-2013).

- Demandes concernant la connaissance de l'hydrodynamique en Manche dans la perspective de l'installation d'hydroliennes dans le Raz Blanchard (Guinard Energies, Alsthom, GDF-Suez, bureaux d'études), (2010-2013).

Comités d'expertise internationaux

Science Council of Japan: Working group for model intercomparison – Subcommittee to Review the Investigation on Environmental Contamination Caused by the Nuclear Accident at Fukushima Dai-ichi, (2012-2013).

Environnement, débat public

- Membre du GT3 du [Groupe radioécologie nord-Cotentin](#), évaluation de l'impact des rejets industriels de radionucléides en mer, (1997-1999).
- [ASN](#), Groupe de réflexion sur le [tritium](#) (Adam-Guillermin *et al.*, 2010), (2010).

9.2 Publications classées

Synthèses des publications et productions :

Type de document	Nombre	1 ^{er} auteur	IF moyen
ACL	26	12	1,6
ACLN	3	3	
C-INV	1	1	
C-ACTI	12	7	
C-ACTN	6	4	
C-AFF	9	6	
OS	6	1	
PV	5	4	
PT	18	11	
AP	7	1	

9.2.1 Articles dans des revues internationales ou nationales à comité de lecture (ACL)

Source des *Impact Factors* (IF): *Journal of Citation Reports* pour l'année concernée, valeur de 2003 pour les publications antérieures.

- (2,6) [Bailly du Bois, P.](#), Guéguéniat, P., Gandon, R., Léon, R., Baron, Y. Percentage contribution of inputs from the Atlantic, Irish Sea, English Channel and Baltic into the North Sea during 1988: a tracer-based evaluation using artificial radionuclides. *Netherlands Journal of Sea Research* 31 (1), 1-17, 1993.

- (1,7) [Bailly du Bois, P.](#), Salomon, J.C., Gandon, R., Guéguéniat, P. A quantitative estimate of English Channel water fluxes into the North Sea from 1987 to 1992 based on radiotracer distribution. *Journal of Marine Systems* 6 (5-6), 457-481, 1995.
- (1) [Bailly du Bois, P.](#), Rozet, M., Thorat, K., Salomon, J.C. Improving knowledge of water-mass circulation in the English Channel using radioactive tracers. *Radioprotection - colloques*, April 1997, Numéro spécial "Radionuclides in the Oceans", RADOCC 96-97, Proceedings Part 1 "Inventories, behaviour and processes" Cherbourg-Octeville (France), 7-11 October, 1996. Edited by: P. Germain, J.C. Guary, P. Guéguéniat and H. Métivier, 32(C2), 63-69, 1997.
- (1,2) [Bailly du Bois, P.](#), Guéguéniat, P. Quantitative assessment of dissolved radiotracers in the English Channel: sources, average impact of la Hague reprocessing plant and conservative behaviour (1983, 1986, 1988 and 1994). *Continental Shelf Research*, FluxManche II dedicated volume 19, 1977-2002, 1999.
- (2,6) [Bailly du Bois, P.](#), Dumas, F. Fast hydrodynamic model for of medium- and long-term dispersion in seawater in the English Channel and southern North Sea, qualitative and quantitative validation by radionuclide tracers. *Ocean Modelling* 9 (2), 169-210, 2005.
- (1) [Bailly du Bois, P.](#), Dumas, F., Solier, L. Hydrodynamic modelling of short-term dispersion in a macro-tidal sea, validation by high-resolution radionuclide tracer measurements. *Radioprotection*, 40 (ECORAD2004 "The scientific basis for environment protection against radioactivity", Aix-en-Provence (France), 6-10 September, 2004. Edited by: J.C. Barescut, J.C. Gariel and J.M. Péres): S563-S568, 2005. DOI: 10.1051/radiopro:2005s1-082.
- (1) [Bailly du Bois, P.](#), Dumas, F. TRANSMER, hydrodynamic model for medium- and long-term simulation of radionuclides transfers in the English Channel and southern North Sea. *Radioprotection* 40, S575-S580, 2005.
- (1,4) [Bailly du Bois, P.](#) Automatic calculation of bathymetry for coastal hydrodynamic models. *Computers & Geosciences* 37 (2011), 1303-1310, 2011.

- (1,3) [Bailly du Bois, P.](#), Laguionie, P., Boust, D., Korsakissok, I., Didier, D., Fiévet, B. Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 114 (0), 2-9, 2012.
- (2,1) [Bailly du Bois, P.](#), Dumas, F., Solier, L., Voiseux, C. In-situ database toolbox for short-term dispersion model validation in macro-tidal seas, application for 2D-model. *Continental Shelf Research* 36 (0), 63-82, 2012.
- (1,8) [Bailly du Bois, P.](#), Garreau, P., Laguionie, P., Korsakissok, I. Comparison between modelling and measurement of marine dispersion, environmental half-time and ¹³⁷Cs inventories after the Fukushima Dai-ichi accident. *Ocean Dynamics*, 64, 361-383, 2014.
- (1,4) [Bailly du Bois, P.](#), Pouderoux, B. System for high frequency stratified in-depth sampling during sailing. *Ocean Engineering* 91, 281-289, 2014.
- (0,6) [Belsher, T.](#), Bailly du Bois, P., Salou, N. Expansion de l'algue d'origine japonaise *Sargassum Muticum* (Yendo) Fensholt, sur les côtes françaises, de 1983 à 1984. *Cahiers de Biologie Marine XXV*, 449-455, 1984.
- (3,5) [Blanpain, O.](#), Bailly du Bois, P., Cugier, P., Lafite, R., Lunven, M., Dupont, J., Le Gall, E., Legrand, J., Pichavant, P. Dynamic sediment profile imaging (DySPI): a new field method for the study of dynamic processes at the sediment-water interface. *Limnology and oceanography: Methods* 7, 8-20, 2009.
- (1,1) [Fiévet, B.](#), Voiseux, C., Rozet, M., Masson, M., Bailly du Bois, P. Transfer of radiocarbon liquid releases from the AREVA La Hague spent fuel reprocessing plant in the English Channel. *Journal of Env. Radioactivity* 90, 173-196, 2006.
- (5,2) [Fiévet, B.](#), Pommier, J., Voiseux, C., Bailly du Bois, P., Laguionie, P., Cossonet, C., Solier, L. Transfer of tritium released into the marine environment by French nuclear facilities bordering the English Channel. *Environmental Science & Technology* 47 (12) : 6693-6703, 2013.
- (1) [Gandon, R.](#), Bailly du Bois, P., Baron, Y. Caractère conservatif de l'antimoine 125 dans les eaux marines soumises à l'influence des rejets de l'usine de retraitement des combustibles irradiés de La Hague. *Radioprotection* 33 (4), 457-482, 1998. DOI: 10.1051/radiopro:1998116.

- (1) Garreau, P., Bailly du Bois, P. Transportation of Radionuclides in Celtic Sea a Possible Mechanisms. *Radioprotection - Colloques 32 (C2)*, 381-385, 1997.
- (1,2) [Guéguéniat, P.](#), Bailly du Bois, P., Gandon, R., Salomon, J.C., Baron, Y., Léon, R. Spatial and Temporal distribution (1987-91) of ¹²⁵Sb used to trace pathways and transit times of waters entering the North Sea from the English Channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 39, 59-74, 1994.
- (1,7) [Guéguéniat, P.](#), Bailly du Bois, P., Salomon, J.C., Masson, M., Cabioch, L. Fluxmanche radiotracers measurements: A contribution to the dynamics of the English Channel and North Sea. *Journal of Marine Systems* 6, 483-494, 1995.
- (1,4) [Guéguéniat, P.](#), Kershaw, P., Herrmann, J., Bailly du Bois, P. New estimation of La Hague contribution to the artificial radioactivity of Norwegian waters (1992-1995) and Barents Sea (1992-1997). *Science of the Total Environment* 202, 249-266, 1997.
- (1,7) [Herrmann, J.](#), Kershaw, P.J., Bailly du Bois, P., Guéguéniat, P. The distribution of artificial radionuclides in the English Channel, southern North Sea Skagerrak and Kattegat, 1990-1993. *Journal of Marine Systems* 6 (5-6), 427-456, 1995.
- (1) [Laguionie, P. et al.](#) Consequences of radioactive releases into the sea resulting from the accident at the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant - Evolution of expert investigation according to the data available. *Radioprotection* 47 (3), 423-447, 2012.
- (1) [Masson, M.](#), Siclet, F., Fournier, M., Maignet, A., Gontier, G., Bailly du Bois, P. Tritium along the French coast of the English Channel. *Radioprotection* 40, S621-S627, 2005. DOI: 10.1051/radiopro:2005s1-091.
- (1,2) [Povinec, P.P.](#), Bailly du Bois, P., Kershaw, P.J., Nies, H., Scotto, P. Temporal and spatial trends in the distribution of ¹³⁷Cs in surface waters of Northern European Seas--a record of 40 years of investigations. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 50 (17-21), 2785-2801, 2003.
- (1) Salomon, J.C., Breton, M., Fraizier, A., Bailly du Bois, P., Guéguéniat, P. A Semi Analytic Mathematical Model for Dissolved Radionuclides Dispersion in the Channel Isles Region. *Radioprotection - Colloques 32 (C2)*, 375-380, 1997.

- (1,2) [Smith, K.J.](#), Leon Vintro, L., Mitchell, P.I., Bailly du Bois, P., Boust, D. Uranium-thorium disequilibrium in north-east Atlantic waters. *Journal of Environmental Radioactivity* 74 (1-3), 199-210, 2004.

9.2.2 Articles dans des revues avec comité de lecture non répertoriées par l'AERES ou dans des bases de données internationales (ACLN)

Bailly du Bois, P., Dumas, F. Modélisation hydrodynamique de la dispersion à court terme dans une mer macrotidale : validation par des mesures à haute résolution de radiotraceurs solubles. *Paralia Proceedings VIII^{es} journées nationales génie civil - génie côtier : session 1*, 139-146, 2004.

Bailly du Bois, P., Dumas, F. TRANSMER, un modèle hydrodynamique rapide et précis pour la simulation à moyen et long terme des transferts de radionucléides en Manche et dans le sud de la mer du Nord. *Paralia Proceedings VIII^{es} journées nationales génie civil - génie côtier : session 1*, 73-80, 2004.

Bailly du Bois, P., Pouderoux, B. Système de prélèvement en profondeur dynamique et en continu. *Proceedings XII^{es} journées nationales génie civil - génie côtier*, 12-14 juin 2012, Cherbourg, *Paralia*: 10 p., 2012.

9.2.3 Conférences données à l'invitation du comité d'organisation dans un congrès national ou international (C-INV)

Bailly du Bois, P., Dumas, F., Solier, L., Voiseux, C. Hydrodynamic models validation by radionuclide tracer measurements. In 11th International Symposium on Environmental Radiochemical Analysis, 15-17/09/2010, Chester, 2010.

9.2.4 Communications avec actes dans un congrès international (C-ACTI)

Bailly du Bois, P., Guéguéniat, P., Gandon, R., Léon, R. Characterizing the mixing of water flowing into the North Sea using artificial gamma emitters (Tramanor cruise, July 1988). In *Résumé in: Radionuclides in the study of marine processes*. Norwich, UK, 10-13 september 1991, Ed. Kershaw J.P., Woodhead D.S. Elsevier Applied Science, 1991.

Bailly du Bois, P., Boust, D., Masson, M., Germain, P., Maro, D., Fiévet, B. Bilan des radionucléides en Manche : sources et distribution dans l'environnement. In

International Symposium on Marine Pollution 5-9 Octobre 1998, thème III : surveillance, transport et répartition des radionucléides, Monaco, 1998.

Bailly du Bois, P., Dumas, F. Dissolved radionuclide measurements used for qualitative and quantitative calibration of hydrodynamic models in the English Channel and the North Sea; validation of "TRANSMER" model, in *Proceedings of 34th International Liege Colloquium on Ocean Hydrodynamics, Tracer Methods in Geophysical Fluid Dynamics*, Liege, 6-10 May 2002, 2002.

Bailly du Bois, P., Germain, P., Rozet, M., Solier, L. Water masses circulation and residence time in the Celtic Sea and English Channel approaches, characterisation based on radionuclides labelling from industrial releases. In *Proceedings from the International Conference on Radioactivity in Environment*, Ed. by Peer Borretzen, Torun Jolle, Per Strand, Monaco, 1-5 September 2002, 2002.

Bailly du Bois, P., Dumas, F. Hydrodynamic modelling of short, medium and long-term dispersion in macro-tidal seas: validation by high-resolution radionuclide tracer measurements for improvement of operational tools, in *JCOMM Technical Report, OCEAN OPS 04 abstracts*, 2004.

Bailly du Bois, P., Boust, D., Laguionie, P., Garreau, P., Theetten, S. Coastal dispersion model reliability in accidental situation (Fukushima, Japan), how to make the most of in-situ measurements? in *JONSMOD, 16th biennial workshop joint numerical sea modelling group*, Brest, France, 21-23 May 2012, 2012.

Bailly du Bois, P., Laguionie, P., Garreau, P., Fiévet, B., Boust, D., Theetten, S. Marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident deduced from seawater measurements: simulation of subsequent marine dispersion, in *ASLO Aquatic Sciences Meeting*, 8-13 July 2012 Lake Biwa, Otsu, Shiga, Japan, Session SS30 "The Impacts of The Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plants on the Ocean", 2012.

Dumas, F., Bailly du Bois, P., Solier, L., Voiseux, C., Legendre, R. Artificial Radionuclides: unique tools to investigate the circulation at various scales over the North West European Shelf, in *43rd International Liège Colloquium on Ocean Dynamics: Tracers of physical and biogeochemical processes, past changes and ongoing anthropogenic impacts*, Liège, Belgium, 2-6 May 2011, 2011.

Guéguéniat, P., Bailly du Bois, P. Uses of the Chernobyl accident's labelling in the English Channel and the north sea waters, in *Congrès IRPA 6-10/06/1994*, Portsmouth: Radioprotection, 1994.

Herer, C., Ravachol, J.Y., Gariel, J.C., Clement, C., Guimier, L., Rebour, V., Baumont, D., Bailly du Bois, P. ASN & IRSN contribution in European Union "Instrument for Nuclear Safety Cooperation" projects, in 20th International Conference On Nuclear Engineering (ICONE20), session 15-1, 2012.

Hunt, G.J., Bailly du Bois, P., Kershaw, P.J., Masson, M. Has ⁹⁹Tc from Sellafield entered the English Channel? in Proceedings from the International Conference on Radioactivity in Environment, Ed. by Peer Borretzen, Torun Jolle, Per Strand, Monaco, 1-5 September 2002, 2002.

Smith, K.J., Leon Vintro, L., Mitchell, P.I., Bailly du Bois, P., Boust, D. Uranium-Thorium disequilibrium in the North East Atlantic, in Proceedings from the International Conference on Radioactivity in Environment, Ed. by Peer Borretzen, Torun Jolle, Per Strand, Monaco, 1-5 September 2002, 2002.

9.2.5 Communications avec actes dans un congrès national (C-ACTN)

Bailly du Bois, P., Maro, D., Germain, P. Le tritium dans l'environnement marin de la manche, *in* journée tritium SFRP, UICF, 19 octobre 1999, 1999.

Bailly du Bois P. Modélisation hydrodynamique de la dispersion à court terme dans une mer macrotidale : validation par des mesures à haute résolution de radiotraceurs solubles, colloque quadriennal du CIRMAT, Rouen, 6-7 décembre 2005, résumé p. 103, 2005.

Bailly du Bois, P., Dumas, F. Validation de modèles hydrodynamiques de dispersion en mer macrotidale à l'aide de radiotraceurs solubles, *in* séminaire d'hydrodynamique côtière, Brest, 15-17 septembre 2003, Ifremer, 2007.

Bailly du Bois, P., Boust, D., Charmasson, S., Didier, D., Arnaud, M., Fiévet, B., Laguionie, P., Duffa, C., Korsakissok, I. Les conséquences de l'accident de Fukushima sur le milieu marin : une crise marine sans précédent, *in* SFRP, l'accident de Fukushima, UICF, 09 fév. 2012.

Bailly du Bois, P., Pouderoux, B. Système de prélèvement en profondeur dynamique et en continu, *in* XII^{es} journées nationales génie civil - génie côtier, 12-14 juin 2012, Cherbourg, 2012.

Guéguéniat, P., Bailly du Bois, P., Salomon, J.C. Transfer Pathways and Transit Time of Dissolved Matter in the English Channel, North Sea and Arctic Indicated by Space-Time Radiotracers Measurement, in BNS/SFEN - 1-3 juin 1995, Bruxelles "Applications non énergétiques des sciences nucléaires", Belgian Nuclear Society, 1995.

Masson, M., Fiévet, B., Bailly du Bois, P., Tenailleau, L., Olivier, A. Le Tritium en Manche, *in* congrès SFRP Tritium, 2009.

9.2.6 Communications par affiche dans un congrès international ou national (C-AFF)

Bailly du Bois, P., Blanpain, O., Cugier, P., Lunven, M., Lafite, R. High resolution field study of sediment dynamics on a strongly heterogeneous bed, in 2010 AGU Fall Meeting, 13-17 December, San Francisco, 2010.

Bailly du Bois, P. Modélisation hydrodynamique de la dispersion à court terme dans une mer macrotidale : validation par des mesures à haute résolution de radiotraceurs solubles, *in* colloque quadriennal du CIRMAT, Rouen, 6 et 7 décembre 2005, 2005.

Bailly du Bois, P. TRANSMER, un modèle hydrodynamique rapide et précis pour la simulation à moyen et long terme des transferts de radionucléides en Manche et dans le sud de la mer du Nord, *in* colloque quadriennal du CIRMAT, Rouen, 6 et 7 décembre 2005, 2005.

Bailly du Bois, P., Dumas, F. Modélisation hydrodynamique de la dispersion à court terme dans une mer macrotidale : validation par des mesures à haute résolution de radiotraceurs solubles, *in* colloque Flotte océanographique française, Marseille, 2010. Bailly du Bois, P., Dumas, F. Dispersion verticale à proximité d'un émissaire (DISVER 2009-2011), *in* colloque Flotte océanographique française, Marseille, 2010.

Bailly du Bois, P., Laguionie, P., Boust, D., Korsakissok, I., Didier, D., Fievet, B. Estimation of Marine Source-term Following Fukushima Dai-ichi Accident, in IRPA 13, Glasgow, 13th International Congress of the International Radiation Protection Association, 2012.

Blanpain, O., Bailly du Bois, P., Cugier, P., Lafite, R., Lunven, M., Dupont, J. Dynamic Sediment Profile Imagery (DySPI): new field device for the study of bedload processes, in UK Young coastal scientists and engineers conference 2007 (YCSEC'07), 2007.

Boust, D., Bailly du Bois, P., Maro, D. Processus de transfert des radionucléides artificiels en milieu marin : dispersion à court terme, réactivité intra-sédimentaire et échange eau-atmosphère, *in* colloque quadriennal du CIRMAT, Rouen, 6 et 7 décembre 2005, 2005.

Laguionie, P., Bailly du Bois, P., Garreau, P., Dumas, F., Theetten, S., Solier, L. Using Artificial Radionuclides to Assess Coastal Circulation Models: case-studies of La Hague (France) and Fukushima (Japan), *in* IRPA 13, Glasgow, 13th International Congress of the International Radiation Protection Association, 2012.

9.2.7 Ouvrages scientifiques (OS)

Chapitres de livres

Adam-Guillermin, A., Antonelli, C., Bailly du Bois, P., Beaugelin-Sellier, K., Boyer, P., Fiévet, B., Garnier-Laplace, J., Gurriaran, P., Le Dizes-Maurel, S., Maro, D., Masson, M., Pierrard, O., Renaud, P., Roussel-Debet, S. Le tritium dans l'environnement, *in* « Livre blanc du tritium », groupes de réflexion menés de mai 2008 à avril 2010 sous l'égide de l'ASN, 44-106, 2010.

Bailly du Bois, P. Exemple de modélisation pour étudier la dynamique des masses d'eaux océaniques, *in* « Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux », Académie des Sciences, rapport sur la science et la technologie n° 27, EDP Sciences, 2007-27, 352-354, 2007.

Charmasson S., Bailly du Bois P., Thébault H., Boust D., Fiévet B. Radioactivité d'origine anthropique en milieu marin, Collection « Mer et Océan » (coord. A. Monaco et P. Prouzet). Environnement : des milieux et des sociétés (HERMES SCIENCE PUBLISHING), 6, 121-154, 2013.

Guéguéniat, P., Gandon, R., Bailly du Bois, P. Les traceurs radioactifs artificiels : un outil pour l'océanographie, *in* La Technique Moderne, 5-6-7, 7-15, 1993.

Guéguéniat, P., Bailly du Bois, P., Gandon, R. Estimation of La Hague contribution to the artificial radioactivity of Norwegian waters (1992-1996) and Barents sea (1992-1997). *In*: Environmental Radioactivity in the Arctic, Per Strand and Andrew Cooke ed., Norwegian Radiation Protection Authority: 102-107, 1995.

Guéguéniat, P., Herrmann, J., Kershaw, P., Bailly du Bois, P., Baron, Y. Artificial radioactivity in the English Channel and the North Sea, *in* Radionuclides in the Oceans, inputs and

inventories, RADOX 96-97, Les Éditions de Physique, Coordinators: P. Guéguéniat, P. Germain and H. Métivier, 121-154, 1997.

Lebaron-Jacobs, L. *et al.* Tritium, *in* Toxicologie nucléaire environnementale et humaine, Lavoisier, Editor: Paris, 30 p., 575-602, 2009.

9.2.8 Publications de vulgarisation (PV)

Bailly du Bois, P., Guéguéniat, P., Cabioch, L. Cartographie des masses d'eaux de la mer du Nord à l'aide des radiotraceurs, *in* Clefs CEA 30, printemps 1995, 1995.

Bailly du Bois, P. Mapping of water masses in the North Sea using radioactive tracers, *in* *Endeavour* 20(1), 2-7, 1996.

Bailly du Bois, P. Modélisation de la dispersion de radionucléides dans l'environnement marin, le modèle TRANSMER Manche - mer du Nord, *in* OPALE, bulletin de la Commission locale d'information de la centrale nucléaire de Gravelines n° 12, Juin 2004, 2 p., 2004.

Bailly du Bois, P. Éléments radioactifs. Ifremer Atlas Basse Normandie, Contaminants chimiques, cited 2012. http://envlit.ifremer.fr/region/basse_normandie/qualite/contaminants_chimiques/elements_radioactifs.

Bailly du Bois P., Laguionie P., Fiévet B., Connan O., Duffa C., Arnaud M., Charmasson S. Fukushima : la mer garde des traces de la catastrophe, *Biofutur*, 53-58, 2013.

Guéguéniat, P., Bailly du Bois, P. Le traçage des rejets en mer - le laboratoire IPSN d'Octeville. Contrôle : N° 111, juin 1996, 1996.

9.2.9 Publications de transfert (PT)

Rapports IPSN et IRSN

Bacon, G., Bailly du Bois, P., Maro, D., Solier, L. Étude du transfert entre l'eau et l'atmosphère d'un rejet marin de tritium (HTO) en zone côtière, IRSN/DEI/SECRE/LRC, 38 p., 2011.

Bailly du Bois, P. Radioactivité et dynamique des masses d'eaux en Manche - mer du Nord, *in* rapport scientifique et technique de l'IPSN 1997, mission communication IPSN, 132-137, 1998.

Bailly du Bois, P. Représentation continue des classes granulométriques des sédiments superficiels de la Manche à partir des travaux de Larsonneur (1971), *in* rapport IRSN/DPRE/SERNAT/2000-23, 14 p., 2000.

Bailly du Bois, P., Crabol, B., Germain, P., Calmet, D. Dispersion des produits chimiques susceptibles d'être émis dans l'environnement suite au naufrage du « levoli Sun », *in* rapport IRSN/DPRE/SERNAT/2001-14, 23 p., 2001.

Bailly du Bois, P. Simulation de la dispersion en milieu marin lors de l'exercice INEX 2000 à Gravelines, *in* comité d'orientation des activités de l'IPSN concernant la crise (CORAC), compte rendu de la vingt-sixième réunion du 29 octobre 2001, IPSN/DPEA/SECRI/2002-47, annexe 2, 11 p., 2001.

Bailly du Bois, P. Modélisation de la dispersion de radionucléides dans l'environnement marin, le modèle TRANSMER Manche - mer du Nord, *in* rapport scientifique et technique de l'IRSN 2002, Direction de la communication IRSN, 194-200, 2002.

Bailly du Bois, P. TRANSMER, modèle de simulation des transferts de radionucléides en milieu marin : choix des options, architecture, validation et fonctionnalités, *in* rapport IRSN/DPRE/SERNAT/2003-04, 188 p., 2003.

Bailly du Bois, P., Dumas, F. Validation de modèles hydrodynamiques de dispersion en mer macrotidale à l'aide de radiotraceurs solubles, *in* rapport d'activité, séminaire d'hydrodynamique côtière, Brest, 15-17 septembre 2003, Ifremer, p. 87, 2003.

Bailly du Bois, P. Construction du fichier bathymétrique du modèle hydrodynamique DISPRO (dispersion d'effluents dans le champ proche d'un émissaire de rejet en mer), *in* rapport IRSN/DEI/SECRE/2004-01, 17 p., 2004.

Bailly du Bois, P. Système de prélèvement dynamique en profondeur, *in* rapport IRSN/DEI/SECRE/2009-003, 13 p., 2009.

Bailly du Bois, P., Dumas, F., Solier, L., Voiseux, C. In-situ database toolbox for short-term dispersion model validation in macro-tidal seas, *in* rapport IRSN/DEI/SECRE/2010-00050, 31 p., 2010.

Bailly du Bois, P., Dumas, F. Short-term model in a macro-tidal sea: precision and sensitivity of modelling compared with tracers and physical measurements, *in* rapport IRSN/DEI/SECRE/2010-00051, 29 p., 2010.

Bailly du Bois P. Concentration de Cs, Sb, Co et Ru hydrolysés dans l'eau de mer par coprécipitation sur Fe-Co-K (Cs) et MnO₂ (Sb, Co et Ru) *in* rapport IRSN/PRP-ENV/SERIS, LRC-AT-MOP-006, 10 p., 2012.

Bailly du Bois P., Morillon M., L. S. Mesure et modélisation de la dispersion verticale dans le raz Blanchard (projet [DISVER](#)). IRSN/Prp-Env/SERIS, 2008-57, 56 p., 2014.

Calmet, D., *et al.* Caractérisation statistique des valeurs des paramètres des modèles de transferts utilisés par le [Groupe radioécologie Nord-Cotentin](#), *in* rapport DPRE/SERNAT/2000-31, indice 2.0, 2000.

Charmasson, S., Arnaud, M., Bailly du Bois, P., Bouisset, P., Garcia, K., Masson, M. Concentrations en divers radionucléides dans les eaux du Rhône et en mer au voisinage de l'embouchure du Grand Rhône, *in* rapport IPSN-SERE, novembre 1996, SERE-96/022, 1996.

Germain, P., Masson, M., Boust, D., Bailly du Bois, P., Maro, D., Fiévet, B. Behaviour of radionuclides released into the marine environment in the North Cotentin area, *in* rapport DPRE/SERNAT 99-15, 1999.

GRNC : Groupe radioécologie Nord Cotentin, *et al.* Rapport du sous-groupe n° 3 : modèles de transfert des radionucléides dans l'environnement, *in* IPSN – Clamart, 500 p., 1999.

Maro, D., Gandon, R., Bailly du Bois, P., Germain, P. Modélisation des transferts en milieu marin du Carbone-14 émis sous forme liquide par les réacteurs à eau pressurisée en fonctionnement normal, *in* synthèse bibliographique, contrat 3707 EDF/SEPTEN, rapport SERE 98/004, 1998.

Maro, D., Masson, M., Fiévet, B., Bailly du Bois, P., Connan, O., Boust, D., Germain, P. Analyse critique des données disponibles de carbone 14 et de tritium dans le Nord Cotentin et en Manche, *in* rapport IRSN/DEI/SECRE, 2008-006, 55 p., 2008.

9.2.10 Autres productions (AP)

Rapports de projets internationaux

Bailly du Bois, P. Quantitative assessment of dissolved radiotracers in the English Channel: sources, average impact of la Hague reprocessing plant and conservative behaviour (1983, 1986, 1988 and 1994), *in* FLUXManche II Final Report - MAST II

MAS2CT940089 "Hydrodynamics and biogeochemical processes and fluxes in the Channel" Section 5, Task R, "Identification of Sediment Processes and Measurements of Water Fluxes using Radiotracers" co-ordinator: P. Guéguéniat, A:74-86, 1997.

Ryan, T., Sequeira, S., Bailly du Bois, P., Nolan, G. Atlantic Modelling and Radionuclide Tracer Network, final report, in EEC Interreg2 project EA-B1IRE-No. 2.13, 23 p., 2001.

Ryan, T., Sequeira, S., Bailly du Bois, P., Nolan, G. Atlantic Modelling and Radionuclide Tracer Network, report 1, in EEC Interreg2 project EA-B1IRE-No. 2.13, 15 p., 2001.

Ryan, T., Sequeira, S., Bailly du Bois, P., Nolan, G. Atlantic Modelling and Radionuclide Tracer Network, report 2, in EEC Interreg2 project EA-B1IRE-No. 2.13, 92 p., 2001.

Science-Council-of-Japan. A review of the model comparison of transportation and deposition of radioactive materials released to the environment as a result of the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Science Council of Japan, in: Sectional Committee on Nuclear Accident Committee on Comprehensive Synthetic Engineering, S.C.o.J. (Ed.), 111 p., 2014.

9.2.11 Bases de données

Ozouf, X. Collecte de données, alimentation et mise en forme d'une base de données de répartition des espèces vivant en Manche, DESS Environnement « sols, eaux continentales et côtières », université de Rouen, rapport. 80 p, 2000.

Struski, C. Création d'une base de données cartographiques de la répartition des espèces vivantes et de l'exploitation du milieu marin de la manche, rapport de stage IPSN-LERFA, 66 p., 1999.

Bibliographie

Adam-Guillermin A., Antonelli C., Bailly du Bois P., Beaugelin-Sellier K., Boyer P., Fiévet B., Garnier-Laplace J., Gurriaran P., Le Dizes-Maurel S., Maro D., Masson M., Pierrard O., Renaud P., Roussel-Debet S. Le tritium dans l'environnement, « Livre blanc du tritium », Groupes de réflexion menés de mai 2008 à avril 2010 sous l'égide de l'ASN, 278 p., 44-106, 2010.

Andrié C., Jean-Baptiste P. Tritium and helium 3 in the northeastern Atlantic ocean during the 1983 Topogulf cruise. *Journal of Geophysical Research* 93 (C10), 12511-12524, 1988.

Aoyama M., Hirose K. Temporal variation of ¹³⁷Cs water column inventory in the North Pacific since the 1960s. *Journal of Environmental Radioactivity* 69 (61-62), 107-117, 2003.

Bacon G. Étude de la dispersion des radionucléides en milieux marin et atmosphérique : exploitation scientifique de données acquises *in situ*, 55 p., 2010.

Bacon G., Bailly du Bois P., Maro D., Solier L. Étude du transfert entre l'eau et l'atmosphère d'un rejet marin de tritium (HTO) en zone côtière. IRSN/DEI/SECRE/LRC, 38 p., 2011.

Bailly du Bois P. Étude de l'expansion de l'algue *Sargassum muticum* sur les côtes françaises. Université Jussieu Paris VII, rapport de stage MST1, 98 p., 1984.

Bailly du Bois P. Bilan des transports entre les îles et le continent en France métropolitaine, proposition de loi. Université Jussieu Paris VII, rapport de stage MST2, 30 p., 1985.

Bailly du Bois P. Bilan et valorisation des terrains côtiers acquis au titre de la taxe des espaces verts. Université de Nantes, rapport de stage DEA, 30 p., 1986.

Bailly du Bois P., Guéguéniat P., Gandon R., Léon R. Characterizing the mixing of water flowing into the North Sea using artificial gamma emitters (Tramanor cruise, July 1988), Résumé In: Radionuclides in the study of marine processes. Norwich, UK, 10-13 september 1991, Ed. Kershaw J.P., Woodhead D.S. Elsevier Applied Science, p. 363, 1991.

Bailly du Bois P., Guéguéniat P., Gandon R., Léon R., Baron Y. Percentage contribution of inputs from the Atlantic, Irish Sea, English Channel and Baltic into the North Sea during 1988: a tracer-based evaluation using artificial radionuclides. *Netherlands Journal of Sea Research* 31 (1), 1-17, 1993.

Bailly du Bois P. Radioécologie marine. CEA - rapport Haut Commissaire, 16 p., 1995.

Bailly du Bois P., Guéguéniat P., Cabioch L. Cartographie des masses d'eaux de la mer du Nord à l'aide des radiotraceurs, Clefs CEA, n° 30, printemps 1995, 1995a.

Bailly du Bois P., Salomon J.C., Gandon R., Guéguéniat P. A quantitative estimate of English Channel water fluxes into the North Sea from 1987 to 1992 based on radiotracer distribution. *Journal of Marine Systems* 6 (5-6), 457-481, 1995b.

Bailly du Bois P. Mapping of water masses in the North Sea using radioactive tracers, *Endeavour*, 20 (1), 2-7, 1996.

Bailly du Bois P. Quantitative assessment of dissolved radiotracers in the English Channel: sources, average impact of la Hague reprocessing plant and conservative behaviour (1983, 1986, 1988 and 1994). FLUXManche II Final Report - MAST II MAS2CT940089 "Hydrodynamics and biogeochemical processes and fluxes in the Channel" Section 5, Task R, "Identification of Sediment Processes and Measurements of Water Fluxes using Radiotracers" co-ordinator : P. Guéguéniat, 74-86, 1997.

Bailly du Bois P., Rozet M., Thorat K., Salomon J.C. Improving knowledge of water-mass circulation in the English Channel using radioactive tracers. Radioprotection - colloques, April 1997, Numéro spécial "Radionuclides in the Oceans", RADOCC 96-97, Proceedings Part 1 "Inventories, behaviour and processes" Cherbourg-Octeville (France), 7-11 October, 1996. Edited by: P. Germain, J.C. Guary, P. Guéguéniat and H. Métivier 32, C2, 63-69, 1997.

Bailly du Bois P. Radioactivité et dynamique des masses d'eaux en Manche - mer du Nord. Rapport scientifique et technique de l'IPSN 1997, mission communication IPSN, 132-137, 1998.

Bailly du Bois P., Boust D., Masson M., Germain P., Maro D., Fiévet B. Bilan des radionucléides en Manche : sources et distribution dans l'environnement, International Symposium on Marine Pollution 5-9 Octobre 1998, Thème III : Surveillance, transport et répartition des radionucléides, Monaco p 1., 1998.

Bailly du Bois P., Rancillac F. Dispersion en milieu marin. IPSN, Comité Scientifique, rapport document « C » 16 juin 1998, 35 p., 1998.

Bailly du Bois P., Guéguéniat P. Quantitative assessment of dissolved radiotracers in the English Channel: sources, average impact of la Hague reprocessing plant and conservative behaviour (1983, 1986, 1988 and 1994). *Continental Shelf Research ; FluxManche II dedicated volume* 19, 1977-2002, 1999.

Bailly du Bois P., Maro D., Germain P. Le tritium dans l'environnement marin de la manche, journée tritium SFRP, UICF, 19 octobre 1999, 2 p., 14 transp., 1999.

Bailly du Bois P. Représentation continue des classes granulométriques des sédiments superficiels de la Manche à partir des travaux de Larssonneur (1971). IRSN/DPRE/SERNAT/LERFA, 2000-23, 14 p., 2000.

Bailly du Bois P. Simulation de la dispersion en milieu marin lors de l'exercice INEX 2000 à Gravelines. IPSN/DPEA/SECRI, 2002-47, annexe 2, 11 p., 2001.

Bailly du Bois P., Crabol B., Germain P., Calmet D. Dispersion des produits chimiques susceptibles d'être émis dans l'environnement suite au naufrage du « levoli Sun », 23 p., 2001.

Bailly du Bois P. Modélisation de la dispersion de radionucléides dans l'environnement marin, le modèle TRANSMER Manche - mer du Nord. IRSN, 194-200, 2002.

Bailly du Bois P., Dumas F. Dissolved radionuclide measurements used for qualitative and quantitative calibration of hydrodynamic models in the English Channel and the North Sea; validation of "TRANSMER" model, Proceedings of 34th International Liege Colloquium on Ocean Hydrodynamics, Tracer Methods in Geophysical Fluid Dynamics, Liege 6-10 May 2002, 7, 2002.

Bailly du Bois P., Germain P., Rozet M., Solier L. Water masses circulation and residence time in the Celtic Sea and English Channel approaches, characterisation based on radionuclides labelling from industrial releases, Proceedings from the International Conference on Radioactivity in Environment, Ed. by Peer Borretzen, Torun Jolle, Per Strand Monaco 1-5 September 2002, 395-399, 2002.

Bailly du Bois P. TRANSMER, modèle de simulation des transferts de radionucléides en milieu marin : choix des options, architecture, validation et fonctionnalités. IRSN/DPRE/SERNAT/LERFA, 2003-04, 188 p., 2003.

Bailly du Bois P., Dumas F. Validation de modèles hydrodynamiques de dispersion en mer macrotidale à l'aide de radiotraceurs solubles, 87 p., 2003.

Bailly du Bois P. Construction du fichier bathymétrique du modèle hydrodynamique DISPRO (dispersion d'effluents dans le champ proche d'un émissaire de rejet en mer). IRSN/DEI/SECRE/LRC, 2004-01, 17 p., 2004a.

Bailly du Bois P. Modélisation de la dispersion de radionucléides dans l'environnement marin, le modèle TRANSMER Manche-mer du Nord, OPALE, bulletin de la Commission locale d'information de la centrale nucléaire de Gravelines n°12, Juin 2004, 2002 p., 2004b.

Bailly du Bois P., Dumas F. Modélisation hydrodynamique de la dispersion à court terme dans une mer macrotidale : validation par des mesures à haute résolution de radiotraceurs solubles. Paralia Proceedings VIII^{es} journées nationales génie civil - génie côtier, session 1, 139-146, 2004a.

Bailly du Bois P., Dumas F. Hydrodynamic modelling of short, medium and long-term dispersion in macro-tidal seas: validation by high-resolution radionuclide tracer measurements for improvement of operational tools, JCOMM Technical Report, OCEAN OPS 04 abstracts, 10-14 mai 2004, p. 2083, 2004b.

Bailly du Bois P., Dumas F. TRANSMER, un modèle hydrodynamique rapide et précis pour la simulation à moyen et long terme des transferts de radionucléides en Manche et dans le sud de la mer du Nord. Paralia Proceedings VIII^{es} Journées nationales génie civil - génie côtier, session 1, 73-80, 2004c.

Bailly du Bois P. Qualification du modèle de dispersion dans le champ proche de l'émissaire de rejet en mer de l'établissement COGEMA La Hague, DisPro V.1. IRSN/DEI/SECRE/LRC, 2005-59, 66 p., 2005a.

Bailly du Bois P. Modélisation hydrodynamique de la dispersion à court terme dans une mer macrotidale : validation par des mesures à haute résolution de radiotraceurs solubles. Colloque quadriennal du CIRMAT, Rouen, 6 et 7 décembre 2005, résumé p. 103, 2005b.

Bailly du Bois P. TRANSMER, un modèle hydrodynamique rapide et précis pour la simulation à moyen et long terme des transferts de radionucléides en Manche et dans le sud de la mer du Nord. Colloque quadriennal du CIRMAT, Rouen, 6 et 7 décembre 2005, résumé p.105, 2005c.

Bailly du Bois P., Dumas F. Fast hydrodynamic model for of medium- and long-term dispersion in seawater in the English Channel and southern North Sea, qualitative and quantitative validation by radionuclide tracers. *Ocean Modelling* 9 (2), 169-210, 2005a.

Bailly du Bois P., Dumas F. TRANSMER, hydrodynamic model for medium- and long-term simulation of radionuclides transfers in the English Channel and southern North Sea. *Radioprotection* 40, S575-S580, 2005b. 10.1051/radiopro:2005s1-084.

Bailly du Bois P., Dumas F., Solier L., 2005. Hydrodynamic modelling of short-term dispersion in a macro-tidal sea, validation by high-resolution radionuclide tracer measurements. *Radioprotection* 40, ECORAD 2004 "The scientific basis for environment protection against radioactivity" Aix-en-Provence (France), 6-10 September, 2004. Edited by: J.C. Barescut, J.C. Gariel and J.M. Péres S563-S568. 10.1051/radiopro:2005s1-082

Bailly du Bois P. Qualification du modèle de dispersion dans le champ proche de l'émissaire de rejet en mer de l'établissement AREVA-NC La Hague, mise à jour DISPRO V.2. IRSN/DEI/SECRE/LRC, 2006-46, 26 p., 2006.

Bailly du Bois P., Germain P., Connan O., Maro D., Masson M. Conséquences environnementales du naufrage de l'ECE, dispersion et concentrations dans l'eau de mer de métaux lourds suite au largage d'acide phosphorique à partir du 31 août 2006, 15 p., 2006.

Bailly du Bois P. Exemple de modélisation pour étudier la dynamique des masses d'eaux océaniques, « Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux », Académie des Sciences, rapport sur la science et la technologie n° 27, EDP Sciences, 2007-2027, 2352-2354, 2007.

Bailly du Bois P., Dumas F. Validation de modèles hydrodynamiques de dispersion en mer macrotidale à l'aide de radiotraceurs solubles, Séminaire d'hydrodynamique côtière, Brest 15-17 septembre 2003 Ifremer, p 87, 2007.

Bailly du Bois P. Éléments radioactifs. Ifremer Atlas Basse Normandie, Contaminants chimiques, 2008a [cited 2012; Available from: http://envlit.ifremer.fr/region/basse_normandie/qualite/contaminants_chimiques/elements_radioactifs].

Bailly du Bois P. Mise au point d'un système de prélèvement pour la validation de modèles de dispersion marine en trois dimensions (projet DISVER). IRSN/DEI/SECRE/LRC, 2008-53, 37 p., 2008b.

Bailly du Bois P., Boyer P., Duffa C. Étude préliminaire pour un outil de gestion de crise radiologique dans les zones marines de France métropolitaine. IRSN/DEI/SECRE, 2008-57, 34 p., 2008.

Bailly du Bois P. Système de prélèvement dynamique en profondeur. IRSN/DEI/SECRE/LRC, 2009-003, 13 p., 2009.

Bailly du Bois P., Blanpain O., Cugier P., Lunven M., Lafite R. High resolution field study of sediment dynamics on a strongly heterogeneous bed, 2010 AGU Fall Meeting, 13-17 december, San Francisco, Poster OS51B-1293, 2010a.

Bailly du Bois P., Dumas F. Dispersion verticale à proximité d'un émissaire (DISVER 2009-2011). Colloque flotte océanographique française, Marseille, 2010a.

Bailly du Bois P., Dumas F. Modélisation hydrodynamique de la dispersion à court terme dans une mer macrotidale : validation par des mesures à haute résolution de radiotraceurs solubles. Colloque flotte océanographique française, Marseille, 2010b.

Bailly du Bois P., Dumas F. Short-term model in a macro-tidal sea: precision and sensitivity of modelling compared with tracers and physical measurements, 29 p., 2010c.

Bailly du Bois P., Dumas F., Solier L., Voiseux C. In-situ database toolbox for short-term dispersion model validation in macro-tidal seas, 31 p., 2010b.

Bailly du Bois P., Dumas F., Solier L., Voiseux C. Hydrodynamic models validation by radionuclide tracer measurements, 11th International Symposium on Environmental Radiochemical Analysis, 15-17 /09/2010, Chester, Oral pres., Res. 2 p., 2010c.

Bailly du Bois P. Automatic calculation of bathymetry for coastal hydrodynamic models. *Computers & Geosciences* 37 (2011), 1303-1310, 2011.

Bailly du Bois P. Concentration de Cs, Sb, Co et Ru hydrolysés dans l'eau de mer par coprécipitation sur Fe-Co-K (Cs) et MnO₂ (Sb, Co et Ru). IRSN/PRP-ENV/SERIS, LRC-AT-MOP-006, 10 p., 2012.

Bailly du Bois P., Boust D., Charmasson S., Didier D., Arnaud M., Fiévet B., Laguionie P., Duffa C., Korsakissok I. Les conséquences de l'accident de Fukushima sur le milieu marin : une crise marine sans précédent, SFRP, l'accident de Fukushima, UICF, 9 février 2012, pres. 1 p., 30 transp., 2012a.

Bailly du Bois P., Boust D., Laguionie P., Garreau P., Theetten S. Coastal dispersion model reliability in accidental situation (Fukushima, Japan), how to make the most of in-situ measurements, JONSMOD, 16th biennial workshop joint numerical sea modelling group, Brest, France 21-23 May 2012, pres. 1 p., 22 transp., 2012b.

Bailly du Bois P., Dumas F., Solier L., Voiseux C. In-situ database toolbox for short-term dispersion model validation in macro-tidal seas, application for 2D-model. *Continental Shelf Research* 36, 63-82, 2012c.

Bailly du Bois P., Laguionie P., Boust D., Korsakissok I., Didier D., Fievet B. Estimation of Marine Source-term Following Fukushima Dai-ichi Accident, IRPA 13, Glasgow, 13th International Congress of the International Radiation Protection Association, 2012d.

Bailly du Bois P., Laguionie P., Boust D., Korsakissok I., Didier D., Fiévet B. Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident. *Journal of Environmental Radioactivity* 114, 2-9, 2012e.

Bailly du Bois P., Laguionie P., Garreau P., Fiévet B., Boust D., Theetten S. Marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident deduced from seawater measurements: simulation of subsequent marine dispersion., ASLO Aquatic Sciences Meeting, 8-13 July 2012 Lake Biwa, Otsu, Shiga, Japan, Session SS30 "The Impacts of The Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants on the Ocean", pres. 1 p., 23 transp., 2012f.

Bailly du Bois P., Pouderoux B. Système de prélèvement en profondeur dynamique et en continu. Proceedings XII^{es} journées nationales génie civil - génie côtier, 12-14 juin 2012, Cherbourg, Paralia 10 p., 2012a.

Bailly du Bois P., Pouderoux B. Système de prélèvement en profondeur dynamique et en continu, XII^e journées nationales génie civil - génie côtier, 12-14 juin 2012, Cherbourg, Pres. orale, 2012b.

Bailly du Bois P., Laguionie P., Fiévet B., Connan O., Duffa C., Arnaud M., Charmasson S. Fukushima : la mer garde des traces de la catastrophe. *Biofutur*, 53-58, 2013.

Bailly du Bois P., Garreau P., Laguionie P., Korsakissok I. Comparison between modelling and measurement of marine dispersion, environmental half-time and ¹³⁷Cs inventories after the Fukushima Dai-ichi accident. *Ocean Dynamics* 64, 361-383, 2014.

Bailly du Bois P., Pouderoux B., Dumas F. System for high-frequency simultaneous sampling at several depths during sailing. *Ocean Engineering* 91, 281-289, 2014.

Belsher T., Bailly du Bois P., Salou N. Expansion de l'algue d'origine japonaise *Sargassum Muticum* (Yendo) Fensholt, sur les côtes françaises, de 1983 à 1984. *Cahiers de Biologie Marine* XXV, 449-455, 1984.

Blanpain O., Bailly du Bois P., Cugier P., Lafite R., Lunven M., Dupont J. Dynamic Sediment Profile Imagery (DySPI): new field device for the study of bedload processes, UK Young coastal scientists and engineers conference 2007 (YCSEC'07), poster, 2007.

Blanpain O. Dynamique sédimentaire multiclasse : de l'étude des processus à la modélisation en Manche, PhD Thesis, université de Rouen, 396 p., 2009.

Blanpain O., Bailly du Bois P., Cugier P., Lafite R., Lunven M., Dupont J., Le Gall E., Legrand J., Pichavant P. Dynamic sediment profile imaging (DySPI): a new field method for the study of dynamic processes at the sediment-water interface. *Limnology and oceanography: Methods* 7, 8-20, 2009.

Boust D., Carpenter M.S.N., Joron J.L. Investigation of authigenic and diagenetic processes by chemical leaching of pelagic sediments from the Cape Verde Abyssal Plain. *Chemical Geology* 68, 69-87, 1988.

Calmet D., Bailly du Bois P., Boust D., Fiévet B., Germain P., Vray F., Renaud P., Louvat D., Rommens C., Crabol B. Caractérisation statistique des valeurs des paramètres des modèles de transferts utilisés par le Groupe radioécologie nord-Cotentin. 2000-2031 Indice 2002, 2000 p., 2000.

Charmasson S., Bailly du Bois P., Thébault H., Boust D., Fiévet B. Radioactivité d'origine anthropique en milieu marin, Collection « mer et océan » (coord. A. Monaco et P. Prouzet). Environnement : des milieux et des Sociétés (HERMES SCIENCE PUBLISHING) 6, 121-154, 2013.

Cugier P. Développement d'un modèle numérique multicouche hétérométrique pour la simulation du transport sédimentaire en Manche ; caractérisation des principaux processus. IPSN/DPRE/SERNAT/LERFA, 2000-24, 98 p., 2000.

Dahlgaard H., Chen Q., Herrmann J., Nies H., Ibbett R.D., Kershaw P.J. On the background level of ⁹⁹Tc, ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in the North Atlantic. *Journal of Marine Systems* 6 (5-6), 571-578, 1995.

Desplats S. Mise au point d'un système de dégazage pour le conditionnement d'échantillons d'eau de mer destinés à la mesure du tritium par émanation de l'hélium 3. IRSN, 2012-012, 49 p, 2012a.

Desplats S. Protocole expérimental pour le dégazage d'échantillons destinés à la mesure du tritium à bas niveau. IRSN, LRC-AT-MOP-009, 20 p, 2012b.

Douez C. Contribution à l'étude de l'hydrodynamisme du littoral Nord Pas-De-Calais, PhD Thesis, université de Chimie, Lille 1, 169 p., 1993.

Dumas F. Construction d'un modèle lagrangien en coordonnées barycentriques pour la simulation de la dispersion de substances solubles en Manche et dans le sud de la mer du Nord. Ifremer/Del/AO, 21 p., 1998.

Dumas F., Bailly du Bois P., Solier L., Voiseux C., Legendre R. Artificial Radionuclides : unique tools to investigate the circulation at various scales over the North West European Shelf, 43rd International Liège Colloquium on Ocean Dynamics: Tracers of physical and biogeochemical processes, past changes and ongoing anthropogenic impacts, Liège, Belgium 2-6 May 2011, Res, 2011.

Fiévet B., Plet D. Estimating biological half-lives of radionuclides in marine compartments from environmental time-series measurements. *Journal of Environmental Radioactivity* 65, 91-107, 2002.

Fiévet B., Voiseux C., Rozet M., Masson M., Bailly du Bois P. Transfer of radiocarbon liquid releases from the AREVA La Hague spent fuel reprocessing plant in the English Channel. *Journal of Env. Radioactivity* 90, 173-196, 2006.

Fiévet B., Pommier J., Voiseux C., Bailly du Bois P., Laguionie P., Cossonet C., Solier L. Transfer of tritium released into the marine environment by French nuclear facilities bordering the English Channel. *Environmental Science & Technology*, 47, 6696-6703, 2013. dx.doi.org/10.1021/es400896t.

Gandon R., Guéguéniat P. Preconcentration of ¹²⁵Sb onto MnO₂ from Seawater Samples for Gamma-ray Spectrometric Analysis. *Radiochimica Acta* 57, 159-164, 1992.

Gandon R., Baron Y., Fraizier A., Boust D., Germain P., Guéguéniat P. Incidences des procédés d'épuration appliqués aux effluents industriels sur le comportement chimique du ruthénium 106 dans l'environnement marin. Cas des rejets de l'usine de retraitement des combustibles irradiés de La Hague. *Radioprotection* 29 (23), 339-361, 1994.

Gandon R., Bailly du Bois P., Baron Y. Caractère conservatif de l'antimoine 125 dans les eaux marines soumises à l'influence des rejets de l'usine de retraitement des combustibles irradiés de La Hague. *Radioprotection* 33 (4), 457-482, 1998. 10.1051/radiopro:1998116.

Garreau P., Bailly du Bois P. Transportation of Radionuclides in Celtic Sea a Possible Mechanisms. *Radioprotection - Colloques* 32, C2 381-385, 1997.

Gaudaire J.M. Étude de la spéciation du ⁶⁰Co dans les effluents de l'usine de retraitement de combustibles irradiés de La Hague ; devenir après rejet dans les eaux de la Manche, Thèse. Rapport CEA-R, p 5867, 1999.

Germain P., Guary J.C., Guéguéniat P., Métivier H.E. Radionuclides in the Oceans. RADOc 96-97. Proceedings Part 1. Inventories, Behaviour and Processes. Cherbourg-Octeville, 7-11 October 1996. *Radioprotection* numéro spécial, colloques 32, C2. Les Éditions de Physique, 422 p., 1997.

Germain P., Masson M., Boust D., Bailly du Bois P., Maro D., Fiévet B. Behaviour of radionuclides released into the marine environment in the North Cotentin area. 1999-15, 1999.

GöteÖstlund H., Gorman Dorsey H., Rooth C.G. Geosecs North Atlantic radiocarbon and tritium results. *Earth and Planetary Science Letters* 23 (1), 69-86, 1974. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X\(74\)90033-8](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(74)90033-8)

GRNC : Groupe Radioécologie Nord Cotentin, Ledenvic P., Calmet D., Amiard J.C., Bailly du Bois P., Boilley D., Bordier J.C., Bretheau F., Dellerio N., Desbordes R., Dubois G. Rapport du sous-groupe n° 3 : modèles de transfert des radionucléides dans l'environnement, 500 p., 1999.

Guéguéniat P., Gandon R., Bailly du Bois P. Les traceurs radioactifs artificiels : un outil pour l'océanographie, *La Technique Moderne* 5-6-7, 7-15, 1993a.

Guéguéniat P., Salomon J.C., Wartel M., Cabioch L., Fraizier A. Transfer Pathways and Transit Time of Dissolved Matter in the Eastern English Channel Indicated by Space-Time Radiotracers Measurement and Hydrodynamic Modelling. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 36, 477-494, 1993b.

Guéguéniat P., Bailly du Bois P. Uses of the chernobyl accident's labelling in the English Channel and the north sea waters, Congrès IRPA 6-10/06/1994, Portsmouth. *Radioprotection* 1, 1994.

Guéguéniat P., Bailly du Bois P., Gandon R., Salomon J.C., Baron Y., Léon R. Spatial and Temporal distribution (1987-91) of ¹²⁵Sb used to trace pathways and transit times of waters entering the North Sea from the English Channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 39, 59-74, 1994.

Guéguéniat P., Bailly du Bois P., Gandon R. Estimation of La Hague contribution to the artificial radioactivity of Norwegian waters (1992-1996) and Barents sea (1992-1997). In: Environmental Radioactivity in the Arctic, Per Strand and Andrew Cooke ed., Norwegian Radiation Protection Authority, 102-107, 1995a.

Guéguéniat P., Bailly du Bois P., Salomon J.C. Transfer Pathways and Transit Time of Dissolved Matter in the English Channel, North Sea and Arctic Indicated by Space-Time Radiotracers Measurement, BNS/SFEN - 1-3 juin 1995 Bruxelles « Applications non énergétiques des sciences nucléaires », Belgian Nuclear Society, 1995b.

Guéguéniat P., Bailly du Bois P., Salomon J.C., Masson M., Cabioch L. Fluxmanche radiotracers measurements: A contribution to the dynamics of the English Channel and North Sea. *Journal of Marine Systems* 6, 483-494, 1995c.

Guéguéniat P., Bailly du Bois P. Le traçage des rejets en mer - le laboratoire IPSN d'Octeville. Contrôle N° 111, juin 1996.

Guéguéniat P., Germain P., Métivier H. Radionuclides in the oceans. Inputs and Inventories. IPSN, Les Éditions de physique, 1996.

Guéguéniat P., Herrmann J., Kershaw P., Bailly du Bois P., Baron Y. Artificial radioactivity in the English Channel and the North Sea, Radionuclides in the Oceans, inputs and inventories, RADOc 96-97, Les Éditions de Physique, Coordinators: P. Guéguéniat, P. Germain and H. Métivier, 121-154, 1997a.

Guéguéniat P., Kershaw P., Herrmann J., Bailly du Bois P. New estimation of La Hague contribution to the artificial radioactivity of Norwegian waters (1992-1995) and Barents Sea (1992-1997). *Science of the Total Environment* 202, 249-266, 1997b.

Herer C., Ravachol J.Y., Gariel J.C., Clement C., Guimier L., Rebour V., Baumont D., Bailly du Bois P. ASN & IRSN contribution in European Union "Instrument for Nuclear Safety Cooperation" projects. The case of Egypt, 20th International Conference On Nuclear Engineering (ICONE20), ASME 2012 Power Conference. ASME, July 30-August 3, Anaheim, California, USA, 2012.

Herrmann J., Kershaw P.J., Bailly du Bois P., Guéguéniat P. The distribution of artificial radionuclides in the English Channel, southern North Sea, Skagerrak and Kattegat, 1990-1993. *Journal of Marine Systems* 6 (5-6), 427-456, 1995.

Hunt G.J., Bailly du Bois P., Kershaw P.J., Masson M. Has ⁹⁹Tc from Sellafield entered the English Channel, Proceedings from the International Conference on Radioactivity in Environment, Ed. by Peer Borretzen, Torun Jolle, Per Strand, Monaco 1-5 September 2002, 391-394, 2002.

Janin J.M., Annebicque A. Modélisation numérique de la dilution des radioéléments rejetés par l'usine de La Hague. *Radioprotection - Colloques* 32, C2 418, 1997.

Jean-Baptiste P., Mantsi F., Dapoigny A., Stievenard M. Design and performance of a mass spectrometric facility for measuring helium isotopes in natural waters and for low-level tritium determination by the ³He ingrowth method. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes* 43 (47), 881-891, 1992. 16/0883-2889(92)90150-D.

Jenkins W.J., Lott D.E., Davis M.W., Birdwhistell S.P., Matthewson M.O. Measuring helium isotopes and tritium in seawater samples. WOCE Hydrographic Operations and Methods, July 1991, 21 p., 1991.

Kautsky H., Weidekind C., Eicke H.F. Radiological investigations in the Baltic Sea, including the Danish Straits and the Kattegat during 1982 and 1983. *Dt. Hydrogr. Z. Erg.-H.B.*, 1984.

Kautsky H. Distribution and content of ¹³⁷⁺¹³⁴Cs and ⁹⁰Sr in the water of the North Sea during the years 1982 to 1984. *Dt. Hydrogr. Z. Erg.-H.B.* 39:139-159, 1986.

Kershaw J.P., Woodhead D.S. Radionuclides in the study of marine processes, Norwich, UK, 10-13 september 1991. Elsevier Applied Science, 393 p., 1991.

Kershaw P., McCubbin D., Leonard K. Continuing contamination of north Atlantic and Arctic waters by Sellafield radionuclides. *Science of the Total Environment* 237-238 (230), 119-132, 1999. 16/S0048-9697(99)00129-1.

Laguionie P., Bailly du Bois P., Boust D., Fievet B., Garreau P., Connan O., Charmasson S., Arnaud M., Duffa C., Champion D. Consequences of radioactive releases into the sea resulting from the accident at the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant - Evolution of expert investigation according to the data available. *Radioprotection* 47 (3), 423-447, 2012a.

Laguionie P., Bailly du Bois P., Garreau P., Dumas F., Theetten S., Solier L. Using Artificial Radionuclides to Assess Coastal Circulation Models: case-studies of La Hague (France) and Fukushima (Japan), IRPA 13, Glasgow, 13th International Congress of the International Radiation Protection Association, 2012b.

Larsonneur C. Manche centrale et baie de Seine : géologie du substratum et des dépôts meubles, Thèse de doctorat d'état, université de Caen, 394 p., 1971.

Lazure P., Dumas F. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources* 31 (32), 233-250, 2008.

Lebaron-Jacobs L., Garnier-Laplace J., Lopez B., Adam-Guillermin C., Dublineau I., Roussel-Debet S., Antonelli C., Fievet B., Bailly du Bois P., Masson M. Tritium, in: Lavoisier (Ed.), Toxicologie nucléaire environnementale et humaine, Paris, 30, 575-602, 2009.

Lesueur P., Jouanneau J.M., Boust D., Tastet J.P., Weber O. Sedimentation rates and fluxes in the continental shelf mud fields in the Bay of Biscay (France). *Continental Shelf Research* 21 (13-14), 1383-1401, 2001.

Lindahl P., Lee S.-H., Worsfold P., Keith-Roach M. Plutonium isotopes as tracers for ocean processes: A review. *Marine Environmental Research* 69 (2), 73-84, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2009.08.002>.

Lyard F., Lefèvre F., Letellier T., Francis O. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics. Earth and Environmental Science* 56 (55), 394-415, 2006. 10.1007/s10236-006-0086-x.

Masson M., Siclet F., Fournier M., Maigret A., Gontier G., Bailly du Bois P. Tritium along the French coast of the English Channel. *Radioprotection* 40, S621-S627, 2005. 10.1051/radiopro:2005s1-091.

Masson M., Fiévet B., Bailly du Bois P., Tenailleau L., Olivier A. Le Tritium en Manche, Congrès SFRP Tritium, 23-24 septembre 2009.

Mitchell P.I., Steele A.K. The marine impact of caesium-134 and -137 from the Tchernobyl reactor accident. *J. Environ. Radioactivity* 6, 163-175, 1988.

Mitchell P.I., Downes A.B., León Vintró L., McMahon C.A. Studies of the speciation, colloidal association and remobilisation of plutonium in the marine environment, In A. Kudo (Ed.), *Plutonium in the environment* Elsevier: Amsterdam, 75-200, 2001.

Nies H., Harms I.H., Karcher M.J., Dethleff D., Bahe C. Anthropogenic radioactivity in the Arctic Ocean -- review of the results from the joint German project. *Science of the Total Environment* 237-238, 181-191, 1999.

Olivier C. Développement d'un modèle numérique multicouche hétérométrique pour la simulation du transport sédimentaire en Manche ; détermination de l'équation de transport par des mesures en canal de laboratoire. IRSN/DEI/SECRE/LRC, 2004-2, 98 p., 2004.

Orbi A., Salomon J.C.. Dynamique de marée dans le golfe normand-breton. *Oceanologica Acta* 11 (1), 55-64, 1988.

Ostlund H.G., Werner E. The electrolytic enrichment of tritium and deuterium for natural tritium measurements, Tritium in the physical and biological sciences vol. 1, IAEA, Vienna, 3-10 may 1961, 95-104, 1962.

Ozouf X. Collecte de données, alimentation et mise en forme d'une base de données de répartition des espèces vivant en Manche. IPSN/DPRE/SERNAT/LERFA, 65 p., 2000.

Povinec P.P., Bailly du Bois P., Kershaw P.J., Nies H., Scotto P. Temporal and spatial trends in the distribution of ¹³⁷Cs in surface waters of Northern European Seas - a record of 40 years of investigations. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 50 (17-21), 2785-2801, 2003.

Povinec P.P., Lee S.H., Kwong L.L.W., Oregioni B., Jull A.J.T., Kieser W.E., Morgenstern U., Top Z. Tritium, radiocarbon, ⁹⁰Sr and ¹²⁹I in the Pacific and Indian Oceans. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 268 (7-8), 1214-1218, 2010.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2009.10.136>

Ryan T., Sequeira S., Bailly du Bois P., Nolan G. Atlantic Modelling and Radionuclide Tracer Network, final report, 23 p., 2001a.

Ryan T., Sequeira S., Bailly du Bois P., Nolan G. Atlantic Modelling and Radionuclide Tracer Network, report 1, 15 p., 2001b.

Ryan T., Sequeira S., Bailly du Bois P., Nolan G. Atlantic Modelling and Radionuclide Tracer Network, report 2, 92 p., 2001c.

Salomon J.C., Guéguéniat P., Orbi A., Baron Y. A lagrangian model for long term tidally induced transport and mixing. Verification by artificial radionuclide concentrations, In: *Radionucléides: A tool for oceanography*. Cherbourg 1-5 juin 1987, Ed. Guary J.C., Guéguéniat P., Pentreath R.J., Elsevier Applied Science Publishers, 384-394, 1988.

Salomon J.C., Guéguéniat P., Breton M. Mathematical model of ¹²⁵Sb transport and dispersion in the Channel, In: *Radionuclides in the study of marine processes*. Norwich, UK, 10-13 september 1991, Ed. Kershaw J.P., Woodhead D.S. Elsevier Applied Science, 74-83, 1991.

Salomon J.C., Breton M., Fraizier A., Bailly du Bois P., Guéguéniat P. A Semi-Analytic Mathematical Model for Dissolved Radionuclides Dispersion in the Channel Isles Region. *Radioprotection - Colloques* 32, C2, 375-380, 1997.

Schlosser P., Bayer R., Bonisch G., Cooper L.W., Ekwurzel B., Jenkins W.J., Khatiwala S., Pfirman S., Smethie W.M. Pathways and mean residence times of dissolved pollutants in the ocean derived from transient tracers and stable isotopes. *Science of the Total Environment* 237-238, 15-30, 1999.

Schwiderski E.W. Atlas of ocean tidal charts and maps, part 1: the semidiurnal principal lunar tide M2. *Marine Geodesy* 64, 219-265, 1983.

Shonfeld W. Numerical simulation of the dispersion of artificial radionuclides in the English Channel and the North Sea. *Journal of Marine Systems*, 6 (5-6), 529-544, 1995.

Smith K.J., Leon Vintro L., Mitchell P.I., Bailly du Bois P., Boust D. Uranium-Thorium disequilibrium in the North East Atlantic, Proceedings from the International Conference on Radioactivity in Environment, Ed. by Peer Borretzen, Torun Jolle, Per Strand, Monaco 1-5 September 2002, 582-585, 2002.

Smith K.J., Leon Vintro L., Mitchell P.I., Bailly du Bois P., Boust D. Uranium-thorium disequilibrium in north-east Atlantic waters. *Journal of Environmental Radioactivity* 74 (1-3), 199-210, 2004.

Struski C. Création d'une base de données cartographiques de la répartition des espèces vivantes et de l'exploitation du milieu marin de la manche. IPSN/DPRE/SERNAT/LERFA, 66 p., 1999.

Taylor C.B. The relationship between electrolytic deuterium and tritium separation factors, and attainment of improved accuracy in radiometric low-level tritium measurement. *Applied Radiation and Isotopes* 45 (46), 683-692, 1994. 16/0969-8043(94)90247-X

Thiébot J., Bailly du Bois P., Guillou S. Numerical modeling of the effect of tidal stream turbines on the hydrodynamics and the sediment transport – Application to the Alderney Race (Raz Blanchard), France. *Renewable Energy* 75, 356-365, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.021>

Thoral C. Recalage de positions de prélèvement en mer à marée. CEA/IPSN/DPEI/SERE/LRM, 30 p., 1995.

Vaslet D., Larssonneur C., Auffret J.P. Les sédiments superficiels de la Manche 1/500 000. Carte géologique de la marge continentale Française, Bureau de recherches géologiques et minières, Centre national pour l'exploitation des océans, 1979.

Watanabe Y.W., Watanabe S., Tsunogai S. Tritium in the Japan Sea and the renewal time of the Japan Sea deep water. *Marine Chemistry* 34 (1-2), 97-108, 1991. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-4203\(91\)90016-P](http://dx.doi.org/10.1016/0304-4203(91)90016-P)

Annexes

- 10.1 Publications classées (§ 9.2)
- 10.2 Bailly du Bois P., Guéguéniat P., Gandon R., Léon R., Baron Y. Percentage contribution of inputs from the Atlantic, Irish Sea, English Channel and Baltic into the North Sea during 1988: a tracer-based evaluation using artificial radionuclides. *Netherlands Journal of Sea Research* 31 (1), 1-17, 1993. DOI:10.1016/0077-7579(93)90012-H
- 10.3 Bailly du Bois P., Salomon J.C., Gandon R., Guéguéniat P. A quantitative estimate of English Channel water fluxes into the North Sea from 1987 to 1992 based on radiotracer distribution. *Journal of Marine Systems* 6 (5-6), 457-481, 1995. DOI:10.1016/0924-7963(95)00018-K
- 10.4 Bailly du Bois P., Guéguéniat P. Quantitative assessment of dissolved radiotracers in the English Channel: sources, average impact of la Hague reprocessing plant and conservative behaviour (1983, 1986, 1988 and 1994). *Continental Shelf Research; FluxManche II*, dedicated 19 (1999), 1977-2002, 1999. DOI:10.1016/S0278-4343(99)00049-7
- 10.5 Bailly du Bois P., Germain P., Rozet M., Solier L. Water masses circulation and residence time in the Celtic Sea and English Channel approaches, characterisation based on radionuclides labelling from industrial releases, Proceedings from the International Conference on Radioactivity in Environment, Ed. by Peer Borretzen, Torun Jolle, Per Strand Monaco 1- 5 September 2002, 395-399, 2002.
- 10.6 Bailly du Bois P., Dumas F. Fast hydrodynamic model for of medium- and long-term dispersion in seawater in the English Channel and southern North Sea, qualitative and quantitative validation by radionuclide tracers. *Ocean Modelling* 9 (2), 169-210, 2005. DOI:10.1016/j.ocemod.2004.07.004
- 10.7 Bailly du Bois P., Dumas F., Solier L., Voiseux C. In-situ database toolbox for short-term dispersion model validation in macro-tidal seas, application for 2D-model. *Continental Shelf Research* 36 (30), 63-82, 2012. DOI:10.1016/j.csr.2012.01.011

- 10.8 [Bailly du Bois P.](#) Automatic calculation of bathymetry for coastal hydrodynamic models. *Computers & Geosciences* 37, 1303-1310, 2011. DOI:10.1016/j.cageo.2010.11.018
- 10.9 [Bailly du Bois P.](#), Pouderoux B., Dumas F. System for high-frequency simultaneous sampling at several depths during sailing. *Ocean Engineering*, 91, 281-289, 2014. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.09.022
- 10.10
- a) Le rapport qui suit décrit en détails le modèle TRANSMER :
Bailly du Bois P. TRANSMER, modèle de simulation des transferts de radionucléides en milieu marin : choix des options, architecture, validation et fonctionnalités. IRSN/DPRE/SERNAT/LERFA, 2003-04, 188 p, 2003.
- b) La publication suivante en reprend les principaux éléments :
[Bailly du Bois, P.](#), Dumas, F. TRANSMER, hydrodynamic model for medium- and long-term simulation of radionuclides transfers in the English Channel and southern North Sea. *Radioprotection* 40 (1), S575-S580, 2005. DOI: 10.1051/radiopro:2005s1-084
- 10.11 [Blanpain O.](#), Bailly du Bois P., Cugier P., Lafite R., Lunven M., Dupont J., Le Gall E., Legrand J., Pichavant P. Dynamic sediment profile imaging (DySPI): a new field method for the study of dynamic processes at the sediment-water interface. *Limnology and Oceanography: Methods* 7, 8-20, 2009. DOI: 10.4319/lom.2009.7.8
- 10.12 [Bailly du Bois P.](#), Laguionie P., Boust D., Korsakissok I., Didier D., Fiévet B. Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident. *Journal of Environmental Radioactivity* 114, 2-9, 2012. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.11.015
- 10.13 [Bailly du Bois P.](#), Garreau P., Laguionie P., Korsakissok I. Comparison between modelling and measurement of marine dispersion, environmental half-time and ¹³⁷Cs inventories after the Fukushima Dai-ichi accident. *Ocean Dynamics* 64, 361–383, 2014. DOI 10.1007/s10236-013-0682-5