

Coordonnatrice : Hélène JEANNERET (1)

Auteurs : Maud GENDRONNEAU (3)
Joël HAURE (2)
Hélène JEANNERET (1)
Yoann LE MERRER (1)
Camille LEQUETTE (1)
Cédric LOMAKINE (4)
Jean Louis MARTIN (2)
Mathias PAPIN (2)
Catherine PONTHEOREAU (3)
Marc ROBIN (4)

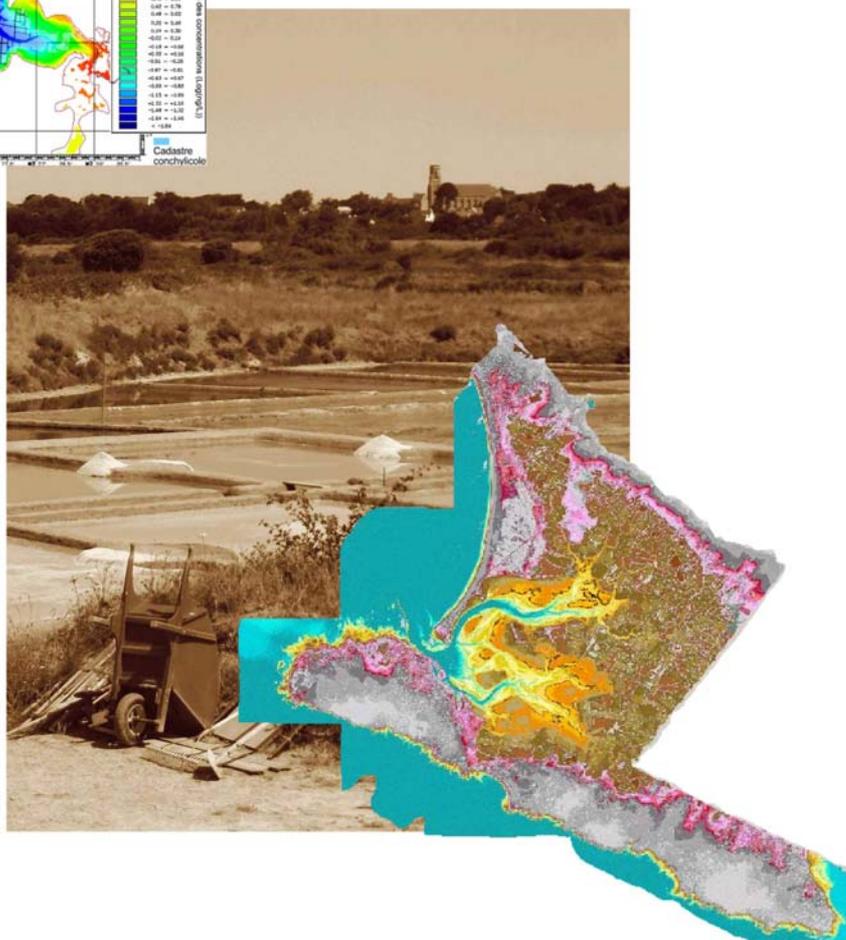
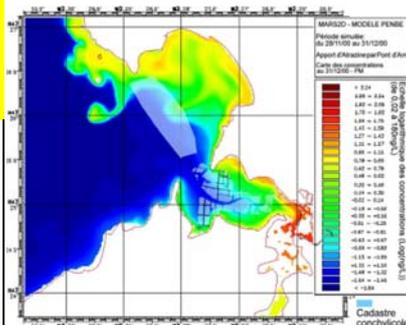
RST/LER/MPL/06.01

(1) Ifremer Nantes (2) Ifremer Bouin (3) CAP Atlantique (4) Géolittomer

Étude des secteurs du Croisic et de Pen-Bé : estimation des apports continentaux et évaluation des stocks conchylicoles



LETG UMR 6554 - CNRS
Littoral, Environnement,
Téledétection, Géomatique



Fiche documentaire

<p>Numéro d'identification du rapport : RST/LER/MPL/06.01</p> <p>Diffusion : libre <input checked="" type="checkbox"/> restreinte: <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/></p> <p>Validé par : Isabelle Auby et Martin Plus (LER-Arcachon), Jean Barret (LER-LR-Sète), Franck Dumas et Jean-François Guillaud (DYNECO-Brest), Jean-Claude Le Saux et Monique Pommepuy (EMP-Brest), Joseph Mazurié (LER-MPL-La Trinité-sur-mer).</p>	<p>Date de publication : mars 2006</p> <p>Nombre de pages : 118 + annexes</p> <p>Bibliographie: oui</p> <p>Illustration(s): oui</p> <p>Langue du rapport : Français</p>
<p>Titre et sous-titre du rapport :</p> <p><i>Etude des secteurs du Croisic et de Pen-Bé : estimation des apports continentaux et évaluation des stocks conchylicoles.</i></p>	
<p>Etude co-financée par la Région Pays de la Loire, dans le cadre du contrat Etat-Région 2000-2006. Convention d'exécution du 10 janvier 2002.</p> <p>Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/></p>	
<p>Coordination : Hélène Jeanneret</p>	<p>Organisme / Direction / Service, laboratoire Ifremer/LER/MPL/Nantes</p>
<p>Auteurs : Maud Gendronneau et Catherine Ponthoreau Cédric Lomakine et Marc Robin Joël Haure, Jean- Louis Martin et Mathias Papin Hélène Jeanneret, Yoann Le Merrer et Camille Lequette</p>	<p>CAP Atlantique (La Turballe, Le Croisic) Géolittomer, Université de Nantes Ifremer- AGSAE Bouin Ifremer/LER/MPL/Nantes</p>
<p>Programme : Surveillance et évaluation de l'état des eaux littorales Projet : Actions Régionales de Surveillance Intégrée Action : Croisic Pen-Bé. B 031113.</p>	

Résumé :

L'Ifremer, l'Université de Nantes et la communauté d'agglomération CAP Atlantique ont rassemblé leurs compétences pour tenter de mieux comprendre le fonctionnement de deux secteurs conchylicoles importants dans l'économie littorale des Pays de la Loire, mais qui restent mal connus sur le plan environnemental et qui sont confrontés à des problèmes récurrents sur le plan zootechnique.

Ce programme s'articule autour de deux thèmes principaux : l'évaluation des apports environnementaux (apports par les bassins versants, devenir des contaminants dans le milieu, impact sur les zones conchylicoles) et l'étude des élevages conchylicoles (croissance, mortalité, étude des stocks en élevage). Ces thèmes sont sous-tendus par le développement d'outils opérationnels (modèles hydrodynamique et de transfert de flux, base de données, SIG), destinés à favoriser la gestion locale de ces sites, et la transmission des informations vers l'ensemble des usagers.

Ce travail, d'un montant de 240 k€ (hors frais de personnel) a été soutenu financièrement par la Région Pays de la Loire de 2002 à 2004.

La restitution finale des résultats (Conseil Scientifique et technologique de juin 2005) a permis de faire le bilan des résultats obtenus :

- développement innovant d'outils opérationnels : modélisation des apports par les bassins versants par un couplage SIG/modèle agro-pédologique (qui a fait l'objet d'une thèse de Doctorat soutenue en mai 2005), modélisation hydrodynamique du devenir des polluants, et première tentative de couplage entre les modèles terrestre et marin ;
- création d'une base de données sur la qualité de l'eau en presqu'île guérandaise, permettant d'améliorer l'information des usagers et les échanges avec les autres producteurs de données ;
- mise en place d'un protocole de suivi des flux, et première évaluation des apports de produits phytosanitaires.
- première évaluation des stocks de coquillages en élevage, avec perspective de définition de méthodes culturales en fonction des potentialités des différents secteurs ;
- contribution à la structuration de la recherche en Région Pays de la Loire, dans l'objectif du futur programme « Mer, estuaire et littoral », dans lequel l'Ifremer et l'Université de Nantes prévoient de poursuivre leur collaboration.

L'intégration des connaissances acquises depuis les bassins versants jusqu'aux traicts fournit une information utilisable par les gestionnaires pour optimiser l'utilisation de l'espace et la cohabitation des diverses activités socio-économiques. Il est dorénavant possible d'évaluer les risques de contamination en provenance des bassins versants, et de prévoir le devenir des substances polluantes dans les traicts, ce qui peut déboucher sur des actions correctrices destinées à améliorer la qualité des eaux pour garantir la pérennité de l'ensemble des usages. Les perspectives de transfert de la méthodologie acquise vers d'autres secteurs (baie de Bourgneuf par exemple), peuvent maintenant s'envisager, en lien avec l'ensemble des acteurs locaux.

Mots-clés : Le Croisic, Pen-Bé, apports continentaux, bassins versants, modélisation, stocks conchylicoles, SIG, bactéries, phytosanitaires.

Remerciements

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements aux membres du Comité Scientifique et Technologique (CST), qui ont suivi avec intérêt le déroulement de cette étude et nous ont permis de l'enrichir grâce à leurs appréciations pertinentes :

- Laurent Barillé, du laboratoire ISOMER de l'Université de Nantes, président du CST, dont il a animé et restitué les débats avec compétence et efficacité ;
- Franck Bruchon, de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie à Honfleur ;
- Gérard Lasserre, de l'Université de Montpellier 2 ;
- Olivier Richard, du Syndicat Mixte pour l'Equipement du Littoral de la Manche ;
- Pascal Chellet et Guy Le Gal, conchyliculteurs ;
- Véronique Canu, Véronique Lefeuvre et Pascal Donini, paludiers ;
- Hélène Forest, de la Région Pays de la Loire ;
- Marie-Pierre Cassagnes et Jean-Luc Millecamps, du Pôle Agronomique de l'Ouest ;
- Philippe Glize, Régis Pajot et Pascal Trintignac du Syndicat Mixte pour le Développement de l'Aquaculture en Pays de la Loire (SMIDAP).

Nous remercions également les stagiaires qui ont contribué efficacement à ces travaux : Emmanuelle Morin (2002), Rémi Buchet (2003) et Benjamin Bauer (2004).

Merci à nos collègues du département Biogéochimie et Ecotoxicologie de l'Ifremer de Nantes : Catherine Munsch, pour ses conseils sur les méthodes d'analyses des produits phytosanitaires, Dominique Auger et Jean-François Chiffolleau pour l'utilisation de la salle blanche.

Plusieurs collègues de l'Ifremer ont accepté de relire ce rapport, nous les remercions pour leurs remarques et avis sur le document initial : Isabelle Auby et Martin Plus (LER - Arcachon), Jean Barret (LER - LR-Sète), Franck Dumas et Jean-François Guillaud (DYNECO - Brest), Jean-Claude Le Saux et Monique Pommepeuy (EMP - Brest), Joseph Mazurié (LER - MPL - La Trinité-sur-mer).

Un grand merci à Françoise Bonneau pour sa patience dans la récupération et la mise en forme des différents fichiers.

Enfin, nous remercions la Région des Pays de la Loire, qui a co-financé ce travail dans le cadre du Contrat Etat – Région 2000 – 2006.

Sommaire

Introduction et objectifs du programme.....	9
Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude	11
1. Présentation physique des bassins versants	11
2. Occupation du sol et économie de la presqu'île	13
3. Caractéristiques hydrodynamiques des traicts	15
3.1. INFLUENCE DES COURANTS	18
3.2. INFLUENCE DU VENT	21
3.3. VOLUMES OSCILLANTS ET RENOUVELLEMENT DES MASSES D'EAU.....	21
3.4. INFLUENCE DES ETIERS.....	23
3.5. INFLUENCE DE LA LOIRE SUR LES TRAICTS DU CROISIC.....	24
3.6. INFLUENCE DE LA VILAINE SUR LE TRAICT DE PEN-BE.....	26
4. Cartographie des peuplements benthiques	29
Chapitre 2 - Outils et développements méthodologiques nécessaires au programme.....	31
1. Mise en place d'une base de données.....	31
2. Système d'Information Géographique.....	33
2.1. ÉVALUATION EMPIRIQUE DES APPORTS AGRICOLES A PARTIR DU RGA	34
2.2. ÉVALUATION DES RISQUES DE TRANSFERT DE POLLUANT PAR HIERARCHISATION DE FACTEURS.....	35
2.3. ÉVALUATION DES RISQUES PAR LA METHODE DE ZONAGE DE ZONES SENSIBLES.....	35
3. Modélisation des apports par les bassins versants	36
4. Estimation des apports par les bassins versants	38
4.1. CHOIX DES STATIONS DE SUIVI ET FREQUENCE DES CAMPAGNES	38
4.2. MESURE DU DEBIT.....	41
4.3. PARAMETRES RETENUS	41
4.3.1. Paramètres généraux de qualité des eaux.....	42
4.3.2. Nutriments	43
4.3.3. Contamination bactériologique.....	44
4.3.4. Métaux.....	44
4.3.5. Phytosanitaires.....	45
5. Modélisation hydrodynamique	47
5.1. POURQUOI UN MODELE NUMERIQUE ?	47
5.2. ACQUISITION DE DONNEES BATHYMETRIQUES : LA TECHNIQUE LIDAR	47
5.3. LE CODE DE CALCUL MARS 2D	49
5.4. PRESENTATION DES MODELES UTILISES.....	50
5.5. CALAGE DES MODELES	51

6. Evaluation des stocks conchylicoles	52
6.1. ESTIMATION DES STOCKS D’HUITRES DANS LE TRAICT DE PEN-BE	52
6.1.1. Méthodologie.....	53
6.1.2. Echantillonnage de terrain.....	53
6.1.3. Traitement des photos aériennes.....	53
6.2. ESTIMATION DES STOCKS DE MOULES DANS LE TRAICT DE PEN-BE	54
6.3. ESTIMATION DES STOCKS DE COQUES DANS LE TRAICT DU CROISIC	55
6.3.1. Mise au point d’une stratégie d’échantillonnage.....	56
6.3.2. Stratification.....	57
6.3.3. Taille du cadrat et effort d’échantillonnage	58
6.3.4. Suivi dynamique de la croissance, de la mortalité et du recrutement naturel.....	59
Chapitre 3 - Résultats.....	61
1. Estimation des apports par les bassins versants	61
2. Caractéristiques physico-chimiques des étiers	68
2.1. EVALUATION DES DEBITS	68
2.2. PARAMETRES GENERAUX DE QUALITE.....	69
3. Mesure des apports dans les traicts.....	71
3.1. NUTRIMENTS	71
3.2. BACTERIES.....	73
3.3. PHYTOSANITAIRES	74
4. Devenir des substances dissoutes dans les traicts	76
4.1. DEVENIR DES BACTERIES DANS LES TRAICTS DU CROISIC.....	77
4.1.1. Impact du vent et de la marée	77
4.1.2. Impact de chaque rejet.....	79
4.2. DEVENIR DES BACTERIES DANS TRAICT DE PEN-BE.....	82
4.3. DEVENIR DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES DANS LES TRAICTS.....	85
4.3.1. Dispersion dans les traicts du Croisic	85
4.3.2. Dispersion dans le traict de Pen-Bé.....	88
5. Evaluation des stocks conchylicoles	92
5.1. ESTIMATION DES STOCKS DE COQUES ET EVOLUTION DANS LE TEMPS	92
5.2. ESTIMATION DES STOCKS D’HUITRES DANS LE TRAICT DE PEN-BE	97
5.3. ESTIMATION DES STOCKS DE MOULES DANS LE TRAICT DE PEN-BE	99
Conclusion et perspectives	101
Bibliographie.....	107
Liste des abréviations et des sigles	115

Introduction et objectifs du programme

Ce programme répond à la nécessité de mieux comprendre le fonctionnement des traicts du Croisic et de Pen-Bé qui sont des secteurs conchylicoles importants pour la Région Pays de la Loire, mais néanmoins mal connus sur le plan environnemental (apports des bassins versants, devenir des contaminants dans le milieu, qualité des eaux et des sédiments, envasement,...) et confrontés à des problèmes récurrents sur le plan zootechnique (mauvaise croissance, mortalité, pathologies,...).

Le programme s'articule donc autour de deux thèmes principaux :

- étude des élevages conchylicoles : croissance, mortalité, étude des stocks en élevage ;
- apports continentaux : évaluation des apports par les bassins versants, devenir des contaminants dans le milieu, impact sur les zones conchylicoles.

Ces thèmes sont sous-tendus par le développement d'outils opérationnels (modèles hydrodynamique et de transfert de flux, base de données, SIG¹ : Système d'Information Géographique), destinés à favoriser la gestion locale de ces sites, et la transmission des informations vers l'ensemble des usagers.

A moyen terme, l'objectif de ce programme est de dépasser le strict cadre du Croisic et de Pen-Bé et de pouvoir appliquer la méthodologie mise au point à d'autres secteurs conchylicoles comme ceux de la baie de Vilaine ou de la baie de Bourgneuf en prenant en compte leurs problèmes spécifiques.

Au plan régional, ce programme s'inscrit dans un ensemble d'études, démarrées pour certaines dès 2001, et qui ont toutes pour objectif la préservation – voire l'amélioration – de la qualité du milieu dans les traicts du Croisic et de Pen – Bé ; en effet, celle-ci conditionne la qualité des coquillages, et par là même, le maintien des usages conchylicoles (élevage, pêche à pied) qui jouent un rôle important dans l'économie locale et régionale. Parmi ces études, on peut citer :

- le développement d'une méthodologie spécifique pour le suivi des stocks de coques dans le traict du Croisic (LCPL de Bouin, en partenariat avec le SMIDAP ; Haure *et al.*, 2002) ;
- la réalisation d'un travail de DEA sur la méthodologie de mise en place d'un SIG sur le bassin-versant des traicts du Croisic par Géolittomer (Lomakine, 2001) ;
- l'état des lieux et la restauration du Domaine Public Maritime conchylicole dans le traict de Pen-Bé, sous maîtrise d'ouvrage du syndicat professionnel (Syndicat des ostréiculteurs de Pen-Bé, 2002) ;

D'autre part, les traicts du Croisic et de Pen - Bé font partie des secteurs qui ont été les plus touchés par la marée noire de l'ERIKA, et sur lesquels une surveillance renforcée de la pollution par les hydrocarbures a été mise en place dans le cadre du plan POLMAR (Chantereau *et al.*, 2002). En parallèle, ces sites sont suivis régulièrement par les différentes équipes qui interviennent dans le programme de recherche sur les conséquences écologiques de cette marée noire, financé par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (<http://www.suivi-erika.info/index.php>).

Parallèlement, le traict du Croisic fait partie des sites sélectionnés au titre de la mise en place du REBENT (REseau BENThique, <http://www.ifremer.fr/rebent/index2.htm>), piloté par l'Ifremer et la DIREN Bretagne. Le REBENT a pour objectifs la réalisation d'un état de

¹ Une liste des sigles figure après la bibliographie

référence des écosystèmes benthiques côtiers, et le maintien d'une veille scientifique permettant de déceler l'évolution des habitats à moyen et long termes.

Cette étude rassemble des équipes aux compétences complémentaires : le laboratoire Morbihan – Pays de Loire (MPL, Ifremer Nantes), le Laboratoire Conchylicole des Pays de la Loire (LCPL, Ifremer Bouin), le département Dynamique de l'Environnement Côtier de l'Ifremer (DYNECO, Brest), le laboratoire GEOLITTOMER de l'Université de Géographie de Nantes et la Communauté d'Agglomération CAP Atlantique.

Les travaux ont duré 3 ans (2002-2004) ; les coûts liés au fonctionnement et à l'investissement représentent 240 k€, financés à 50% par la région Pays de la Loire, qui a financé également une thèse sur ce programme. Les moyens en personnel sont évalués à 10 équivalent temps-plein pendant 3 ans.

Le bilan des actions engagées, l'évaluation des moyens humains et financiers mis en œuvre ont été présentés chaque année lors d'un Conseil Scientifique et Technologique (CST), qui regroupe les partenaires du programme, la Région Pays de la Loire, le SMIDAP, des représentants des conchyliculteurs et des paludiers et des experts scientifiques.

Ce document constitue le rapport final et fait la synthèse de l'ensemble des données acquises au cours du programme, qui sont rassemblées dans les annexes.

Chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude

Les bassins versants des traicts² du Croisic et de Pen-Bé se situent au Nord Ouest du département de la Loire Atlantique, sur la presqu'île guérandaise, entre l'estuaire de La Vilaine au Nord et celui de La Loire au Sud (voir carte de localisation générale dépliant *in fine*).

Ils constituent deux entités hydrographiques originales, au relief peu marqué (l'altitude maximale est de 60 m sur le coteau de Guérande), et fortement soumises à l'influence de la marée. Bien que chacun de ces bassins versants présente des caractéristiques propres, ils ont en commun d'être, d'amont en aval, le théâtre d'une cohabitation parfois délicate entre les différents usagers de la ressource en eau. Lomakine (2005) en donne une description très détaillée, tant sur le plan du réseau hydrographique que de l'occupation du sol.

1. Présentation physique des bassins versants

Le bassin versant des traicts du Croisic s'étend sur les communes de Batz sur Mer, Le Croisic, La Turballe et Guérande. Il couvre une superficie relativement modeste de 4050 ha et forme le bassin occidental des marais salants guérandais.

Ce bassin versant, fortement urbanisé, peut être divisé en trois grands secteurs de l'amont vers l'aval (Morin, 2002 ; Buchet, 2003) :

- la ceinture urbaine de Guérande au Croisic : zone présentant un coteau agricole, sans cours d'eau principal, mais avec un ensemble de petits ruisseaux à écoulement temporaire, non soumis à l'influence des marées. Lomakine (2005) dénombre une vingtaine de bassins versants élémentaires qui alimentent les étiers des marais salants. Dans le secteur du Croisic et de Batz-sur-mer, le réseau hydrographique est quasiment inexistant, et les écoulements se font en général par le réseau d'évacuation des eaux pluviales.
- les marais salants guérandais : zone sans relief soumise à la marée, aménagée pour l'activité salicole et séparée du Domaine Public Maritime (DPM) par une digue.
- les traicts du Croisic (696 ha) : partie du DPM occupée par l'activité conchylicole (production de palourdes, de moules, d'huîtres et surtout de coques).

Le bassin versant du traict de Pen Bé, dit aussi bassin du Mès, s'étend sur les communes de Mesquer, Saint-Molf, Assérac, Guérande, Saint-Lyphard et Herbignac. Il a une superficie totale de 13240 hectares.

Ce bassin versant à dominante agricole peut être subdivisé en quatre secteurs d'amont en aval :

- le haut bassin du Mès : zone à vocation agricole de type polyculture-élevage, ponctuée de mares et d'étangs. On y trouve la source du Mès (à Crémeur) qui est un fleuve côtier alimenté par des ruisseaux pérennes.
- la vallée moyenne : zone de prés et de marais inondables, à vocation d'élevage agricole. Elle comporte un réseau dense de canaux et fossés.

² Le mot traict vient du Breton « trec'h », sable, qui désigne plus particulièrement la zone intertidale de l'estuaire (Sogreah, 2002). L'exutoire du bassin versant du Mès est constitué par le traict de Pen Bé.

- la basse vallée : zone d'influence permanente à l'eau salée, dédiée aux activités salicoles et conchylicoles. Son état initial a été nettement modifié à cet effet (endiguements, construction de levées, dispositifs de prélèvement et rejet d'eau...).
- les traicts de Mesquer et de Pen Bé : l'activité aquacole y est très importante, la moitié de la surface du DPM étant occupée par des parcs d'élevage d'huîtres et de moules. Ce secteur, en partie envasé, est largement découvert à marée basse.

Enfin, ces deux bassins versants se situent entre les grands estuaires de La Loire et de La Vilaine. L'étude préliminaire de leurs impacts respectifs sur les traicts du Croisic et de Pen-Bé est abordée plus loin.

Le territoire d'étude est soumis à un climat océanique, avec une température moyenne annuelle de 11,5°C et des amplitudes thermiques modérées.

La pluviométrie moyenne annuelle varie entre 653 mm/an à La Baule et 812 mm/an à Mesquer (données Météo France). Le maximum des pluies s'observe sur une période allant du mois d'octobre au mois de février (80 à 95 mm/mois), le minimum se situe en juillet et août avec 30 à 35 mm/mois ; on observe toutefois des variations importantes d'une année à l'autre, comme le montre la figure 1.

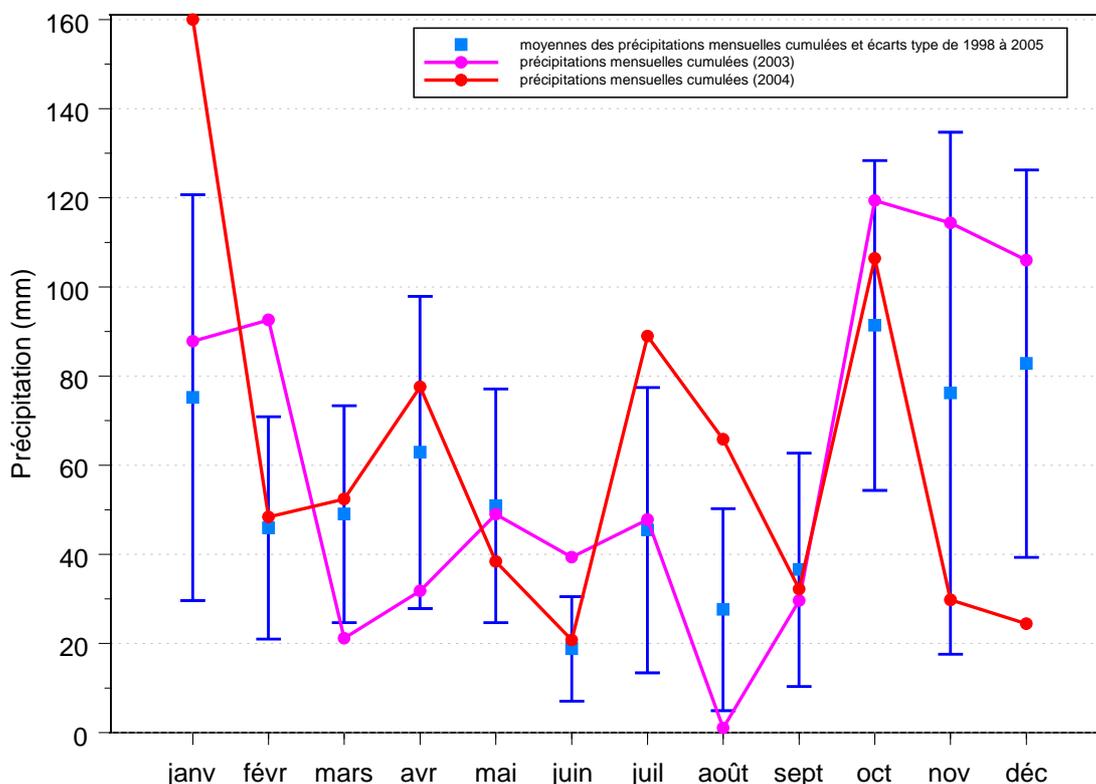


Figure 1. Précipitations mensuelles de 1998 à 2004 à Guérande (Sissable)

Durant l'été 2003, les précipitations ont été exceptionnellement faibles ce qui a fortement perturbé le suivi des flux de contaminants (pas ou peu de transfert vers les cours d'eau).

L'enregistrement des vents à la station Météo-France de St Nazaire (données 1971-2000) montre que la vitesse la plus souvent rencontrée dans ce secteur est comprise entre 2m/s et 4m/s (50% des enregistrements). Les vents dominants sont ceux des secteurs Ouest-Sud - Ouest et Nord-Est.

2. Occupation du sol et économie de la presqu'île

L'occupation de l'espace par l'**agriculture** n'est pas homogène sur le territoire étudié (Fig.2). Les surfaces agricoles représentent environ 60% sur les bassins versants du traict de Pen-Bé, tandis qu'elles n'occupent que 20% sur les bassins versants des traicts du Croisic (et sont même inexistantes sur le bassin versant du Grand Traict), où l'urbanisation est prépondérante (jusqu'à 65 % au Grand Traict, contre 15% à Pen-Bé).

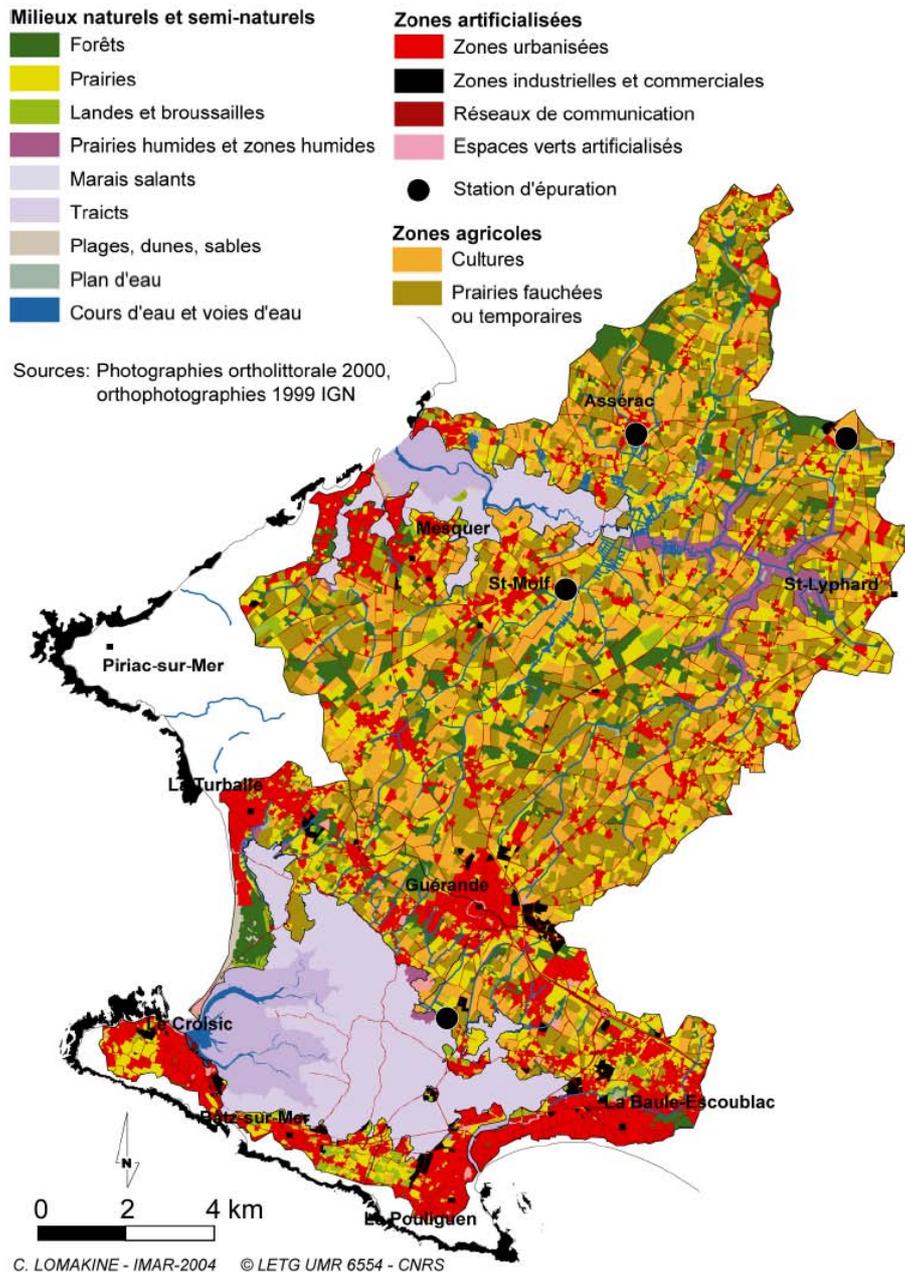


Figure 2. Occupation du sol sur les bassins versants de la presqu'île guérandaise.

L'activité agricole prédominante sur les bassins versants est de type polyculture-élevage. En effet, en raison de la nature des sols, peu favorable aux cultures de céréales et d'oléoprotéagineux, la principale activité est l'élevage bovin (lait, viande : 77% des exploitations). Les terres qui ne servent pas au pâturage sont utilisées pour produire du

fouillage, du maïs ensilage et des céréales destinées à l'alimentation des animaux (Chambre d'Agriculture, 2003).

On notera, également, l'existence sur le territoire de quelques exploitations spécialisées pratiquant la vente en circuit court (lapins, biches, volailles...), de sites d'arboriculture notamment fruitière, de maraîchage et de quelques élevages hors-sol (2 de porcs sur le bassin du Mès et 1 de volailles à la Baule, situé hors du bassin des traicts du Croisic ; Buchet, 2003).

La vocation du territoire est fortement tournée depuis plus d'un siècle vers le tourisme balnéaire. Ceci a induit une urbanisation particulièrement dense du bassin versant des traicts du Croisic, considéré également comme le lieu de villégiature de la métropole nantaise. La population de la presqu'île subit ainsi de fortes variations saisonnières : elle passe de 64 000 habitants en hiver (183 hab./km²) à 400 000 en été (Comité d'Expansion Economique de la Loire-Atlantique : CODELA, 2003). Par ailleurs, 51 % des logements sont des résidences

secondaires (Chambre de Commerce et d'Industrie : CCI, 2003 ; Fig. 3).

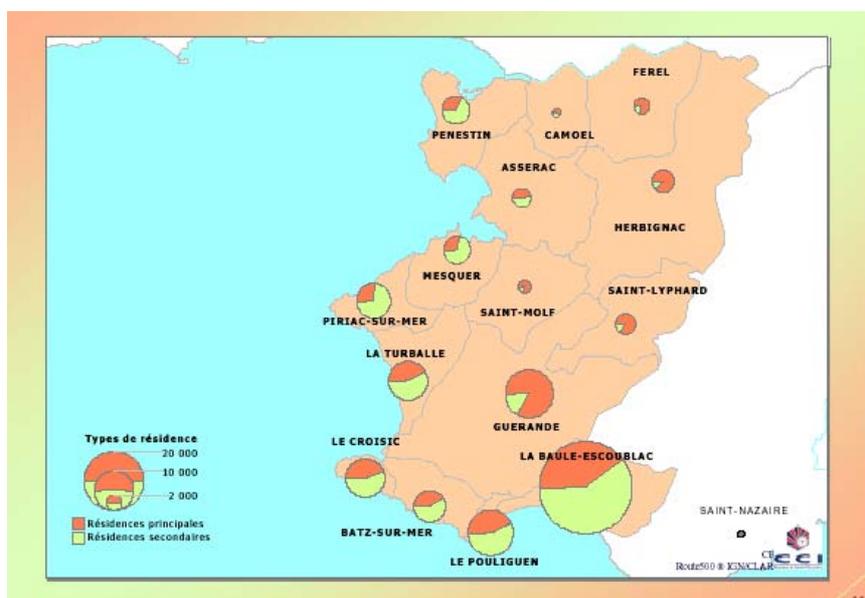


Figure 3. Répartition des résidences secondaires sur le territoire de CAP Atlantique (CCI, 2003)

Pour le bassin versant du Mès, les communes plus rurales connaissent aussi, depuis peu, un essor de l'urbanisation, mais de façon plus diffuse ; le développement touristique se traduit en particulier par la présence de nombreuses aires de camping et de caravaning.

Sur le littoral se côtoient les activités salicoles, conchylicoles, touristiques et

portuaires dont les retombées économiques sont importantes pour le territoire.

La **saliculture** s'exerce dans les marais salants situés en amont des traicts du Croisic (2000 hectares) et de Pen-Bé (580 hectares) ; ces marais constituent des secteurs d'une grande richesse floristique et faunistique et contribuent largement à l'attrait touristique du secteur. La saliculture, qui est évidemment l'une des activités les plus tributaires de la qualité de l'eau, représente 400 emplois directs pour un chiffre d'affaire estimé, en 2002, à 16 millions d'euros environ (CAP Atlantique, 2003).

Dans les traicts du Croisic, la **conchyliculture** (650 ha de concessions) est essentiellement tournée vers l'élevage de la coque ; quelques concessions produisent également des huîtres, des moules et des palourdes. A Pen-Bé, les surfaces concédées sont moindres : 280 ha, dont plus de 80% utilisées pour l'élevage de l'huître. Toutes productions confondues (palourdes, coques, huîtres et moules), la conchyliculture représente un chiffre d'affaire estimé à 6 millions d'euros par an en moyenne. Cette activité emploie environ 40 salariés à temps plein. Les traicts du Croisic et de Pen-Bé sont classés en B sur le plan sanitaire, ce qui signifie qu'ils subissent occasionnellement des contaminations microbiologiques liées

aux activités présentes sur les bassins versants. Les coquillages doivent donc transiter, avant commercialisation, par un bassin de purification alimenté en eau de mer.

Enfin, l'économie de ce territoire est principalement orientée vers le secteur tertiaire (Fig. 4). Les secteurs d'activités concernent essentiellement l'éducation, la santé et les services aux particuliers.

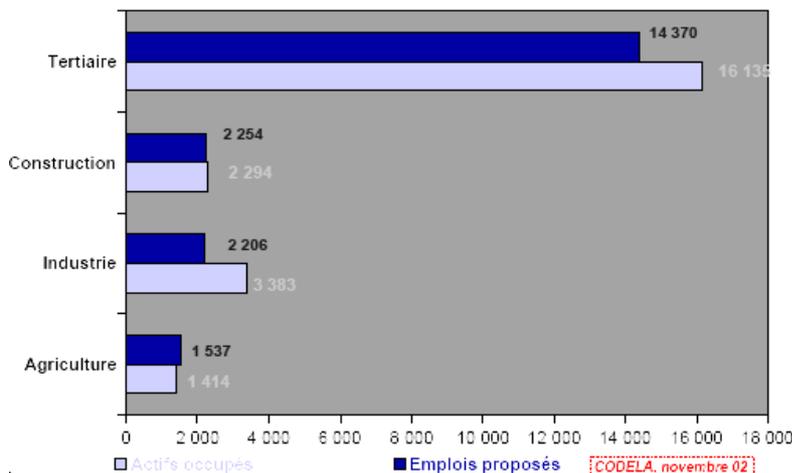


Figure 4. Répartition des actifs par secteurs d'activités sur CAP Atlantique (CODELA, 2003)

Les industries sont peu nombreuses sur ces bassins versants et dépassent rarement la centaine d'employés. On peut citer quelques industries agroalimentaires (2), d'édition et d'imprimerie (2), de travail de métaux (2) ... Ce nombre est minime comparé aux grandes zones industrielles de l'estuaire de La Loire situées à quelques dizaines de kilomètres de la presqu'île. De nombreuses entreprises artisanales sont, par contre, présentes sur le territoire, principalement

dans les domaines de la construction, du commerce et des services (CODELA, 2003).

En conclusion, bien que les activités économiques ne soient pas identifiées comme ayant un fort potentiel de pollution, l'aménagement du territoire laisse une faible place aux zones tampons naturelles. Ainsi, chaque apport polluant, même minime, peut avoir un impact sur la qualité du littoral et les productions conchylicoles et salicoles. Ce programme d'étude et les outils qui seront mis en place, doivent donc permettre d'estimer l'impact des apports anthropiques réels sur ces sites afin d'envisager, à terme, les mesures correctives adaptées.

3. Caractéristiques hydrodynamiques des traicts

La marée, sur l'ensemble de la façade Atlantique et les côtes de la Manche est essentiellement de type semi-diurne, de période environ égale à 12h24mn.

Le marnage, différence entre les niveaux de pleine et basse mer, est dans cette région de l'ordre de 3 m pour des marées moyennes. Il est, au Croisic, respectivement de 4,7m et 2,3m en périodes de vive et morte-eau moyenne (Carte SHOM n°7033 P, 1991).

Dans le traict du Croisic, la rareté des rides sur le fond témoigne d'une absence de vagues importantes. La configuration géographique du site en est à l'origine. En effet, l'étranglement naturel de l'entrée du traict, associé à la présence de la jetée du Tréhic limitent le fetch (distance maximale sur laquelle agit le vent) et ne laisse passer que très peu d'énergie en provenance des secteurs Ouest et Ouest-Sud-Ouest ; cette énergie est elle-même diffractée et réfractée à l'entrée du site autour de la jetée (le peu de houle rentrante va se répartir à l'intérieur du traict et donc perdre en amplitude). Ainsi, une houle de hauteur significative supérieure à 0,3 m au niveau de la jetée ne se produirait que quelques heures par an

(Sogreah, 1997). Quand bien même on serait en présence de cette houle, son pouvoir dispersif resterait négligeable par rapport à celui des courants de marée.

La configuration du secteur de Pen-Bé en fait un site plus exposé, avec des houles de 4 m pouvant atteindre Pont-Mahé en cas de vent relativement fort (15 m/s) en provenance des secteurs Ouest-Sud-Ouest. Selon l'exposition, une partie plus ou moins importante de la houle va s'introduire dans le traict, limitée alors par la hauteur d'eau. On estime en effet la hauteur de houle maximale avant déferlement à 0,8 fois la hauteur d'eau, soit par exemple, 2,4 m de houle crête à crête pour une profondeur de 3m.

Le choix du modèle MARS 2D a paru adapté aux caractéristiques physiques de ces deux secteurs, en particulier de leur faible profondeur qui limite l'action des vagues (non prise en compte par MARS 2D). Les données altimétriques issues de la mission LIDAR de septembre 2002 (Fig. 5) rendent compte de la bathymétrie précise des traicts du Croisic et de Pen-Bé.

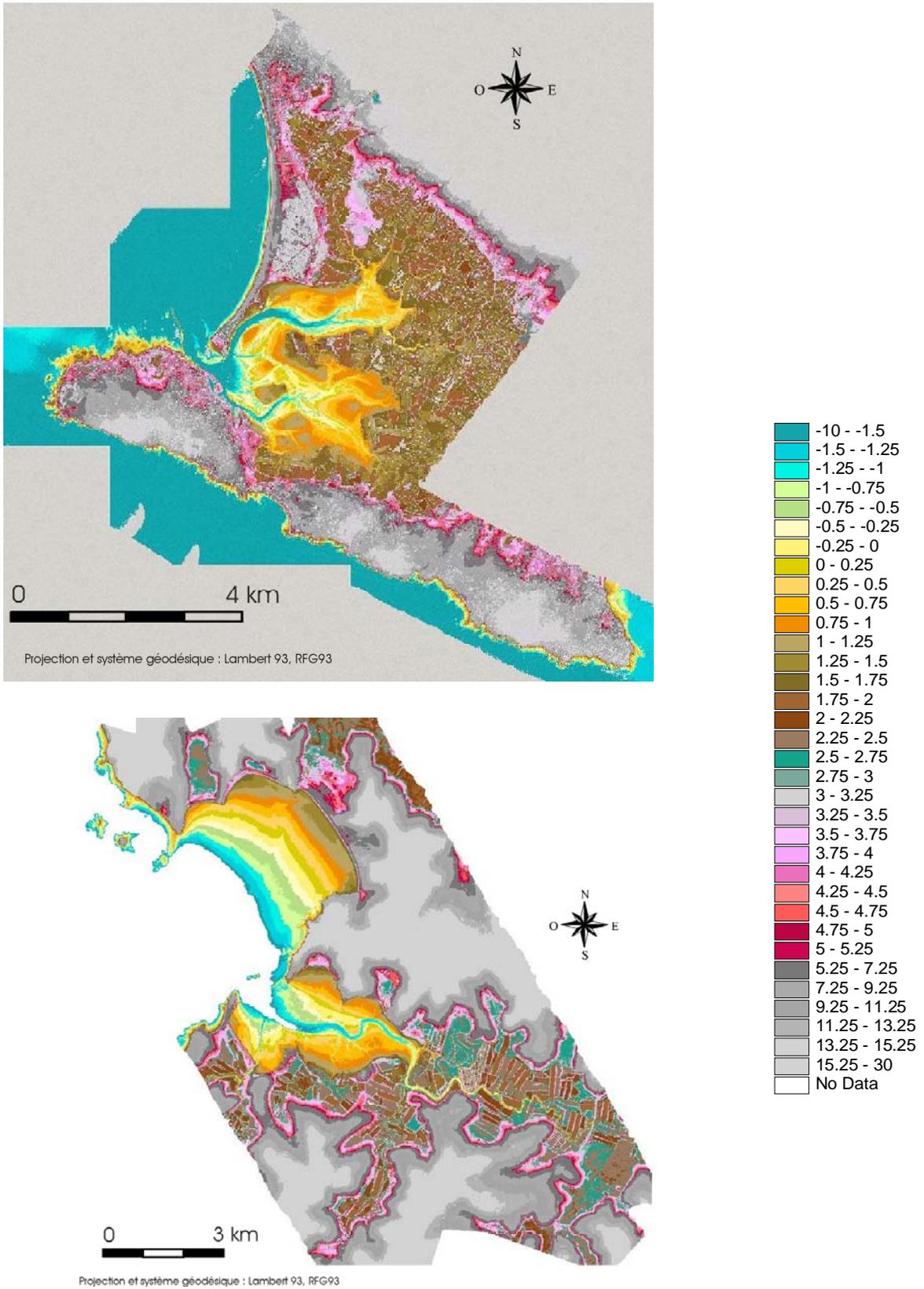


Figure 5. Données altimétriques issues de la mission LIDAR de septembre 2002 (Le Croisic en haut, Pen-Bé en bas ; hauteurs en mètres)

3.1. Influence des courants

L'étude des trajectoires des particules d'eau dans les systèmes côtiers permet de se faire une bonne idée des excursions de flot et de jusant pour quelques points particuliers. Ils mettent particulièrement en évidence l'importance de l'instant du rejet dans le cycle de marée (pleine ou basse mer), ainsi que les différences hydrodynamiques importantes qui peuvent exister entre deux points relativement proches. Le modèle permet – il s'agit de son usage initial – d'extraire des cartes de courants, qui sont ici brièvement décrites. Elles ont été tracées pour chaque site en marée de vive et morte-eau et en l'absence de vent, et sont présentées en annexe 1. Le lecteur pourra donc s'y référer pour plus de précisions.

Secteur du Croisic

Une importante circulation d'eau est mise en évidence au Nord-Ouest de la pointe du Croisic par la visualisation des débits résiduels³ (Fig. 6, et annexe 2 – Fig.3). Les masses d'eau se déplacent d'Est en Ouest, de la jetée du Tréhic à la pointe du Croisic. Cependant, ces résultats sont à prendre avec précaution du fait de la proximité des limites du domaine d'étude ; ils devraient être confirmés sur un modèle d'emprise plus grande.

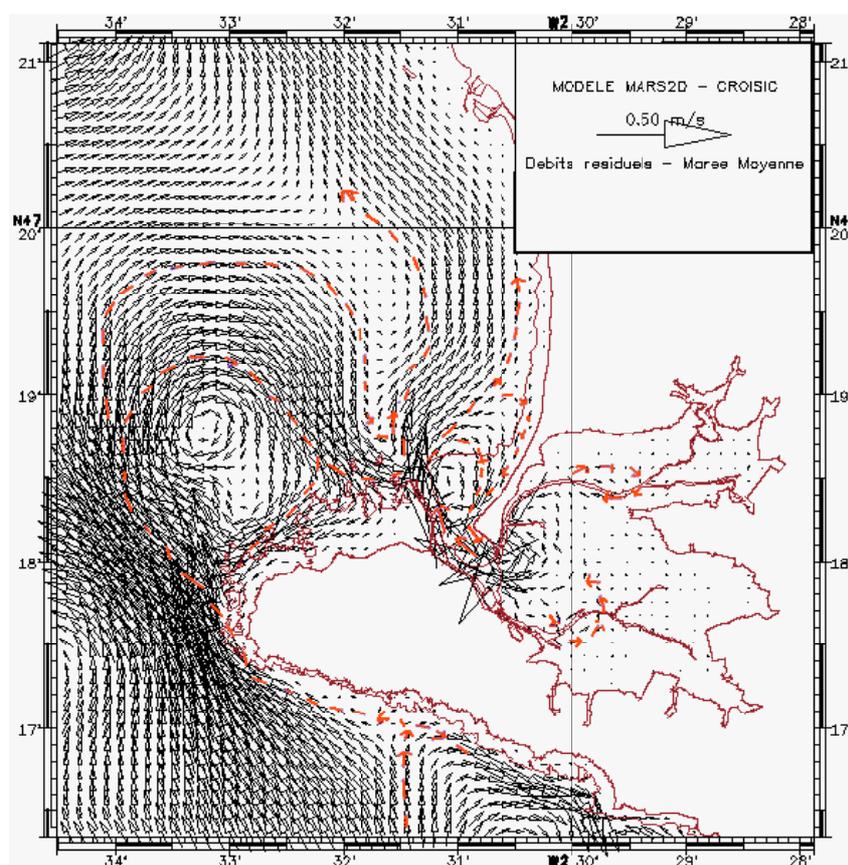


Figure 6. Débits résiduels dans le secteur du Croisic, marée moyenne.

³ Pour des courants parfaitement symétriques entre le flot et le jusant, la moyenne des valeurs observées sur un cycle de marée donne une valeur nulle, chaque vitesse compensant son opposée. En revanche, si des différences existent, une valeur non nulle subsistera, appelée dérive eulérienne, nommée ici courant moyen. Dans le cas d'un étier, d'une rivière ou de tout autre source d'eau douce ressentant l'influence de la marée, le courant moyen correspondra donc, à peu de choses près, à celui du cours d'eau.

Afin d'être plus pertinent en terme de transport, il est préférable d'utiliser le débit moyen (ou résiduel), qui prend en compte la hauteur d'eau et qui permet de renseigner sur la direction des mouvements résiduels, en particulier lorsque les profondeurs sont faibles et que l'écoulement est unidimensionnel.

Au niveau de cette même jetée, on observe une séparation des courants moyens. Une partie, côté Ouest est orientée vers l'intérieur des traicts, tandis que l'autre est orientée vers la Turballe. Ce sens de circulation nous renseigne donc sur l'origine des eaux de renouvellement des traicts du Croisic et serait à confirmer ultérieurement par l'utilisation d'un modèle tridimensionnel.

En revanche, les débits résiduels sont faibles à l'intérieur des traicts, on note cependant l'existence de petites circulations adjacentes (en rouge Fig. 6, et annexe 2 – Fig.3).

Les courants à l'intérieur des traicts du Croisic suivent principalement l'axe des chenaux, où ils sont les plus importants.

On note ainsi, pour le traict du Croisic, des vitesses pouvant atteindre 2 m/s dans le chenal principal et 1,3 m/s dans les chenaux des Vaux et de Pen-Bron (Fig.7) pour une marée de vive-eau.

Une dissymétrie existe entre les modules de vitesse au cours de la marée : les vitesses maximales observées à marée montante et descendante ne sont pas identiques, et les masses d'eau n'emprunteront pas exactement le même chemin au flot et au jusant.

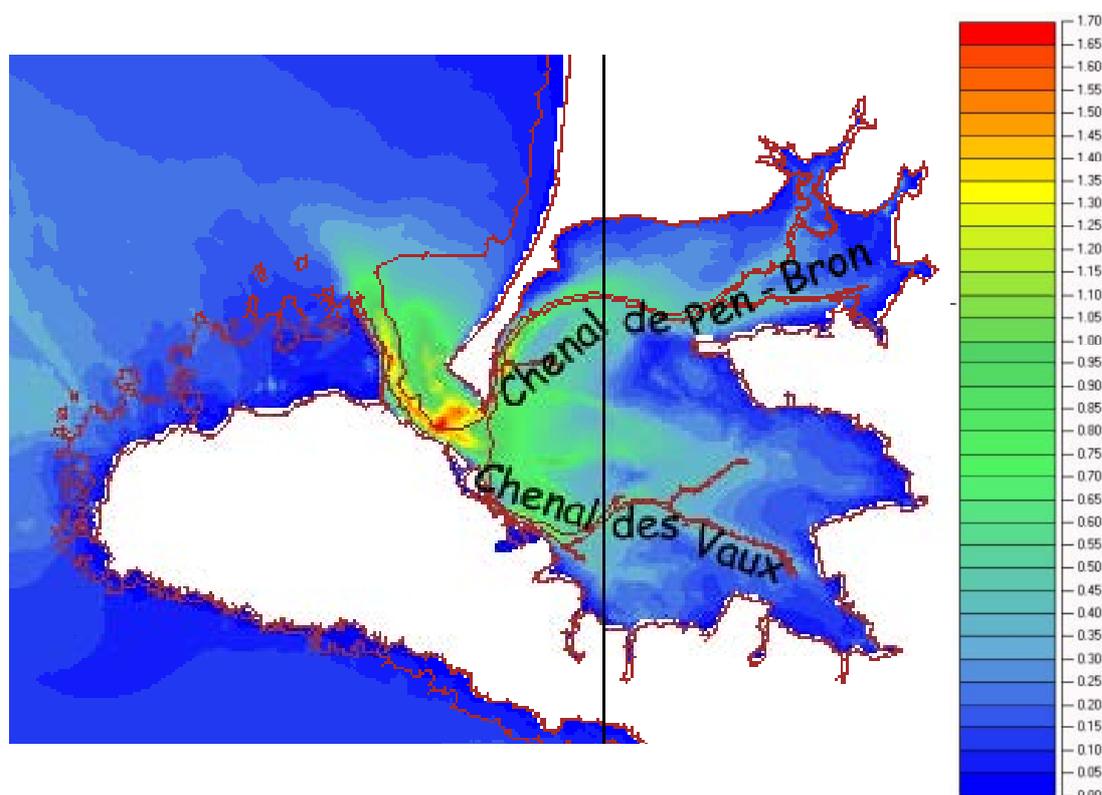


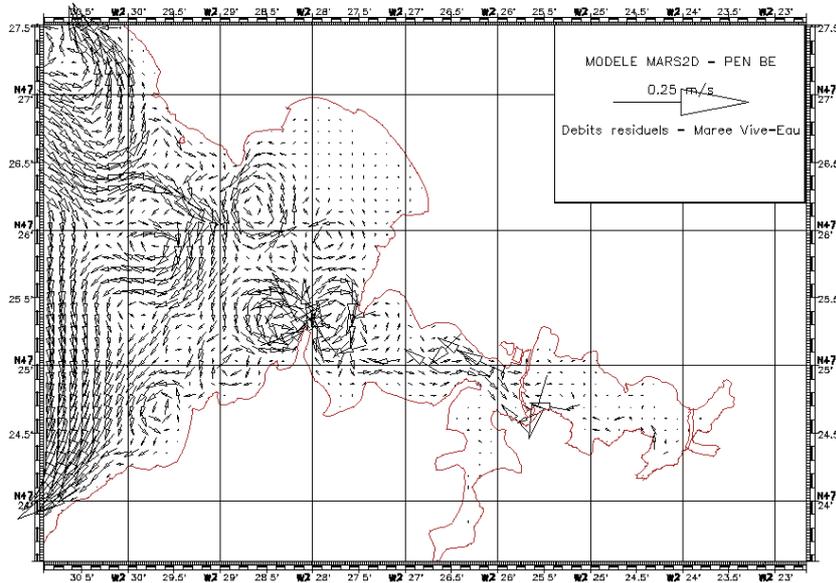
Figure 7. Vitesses Maximales dans le traict du Croisic – MARS-2D (coefficient 95, sans vent)

Secteur de Pen-Bé

La baie de Pont-Mahé, dépourvue d'apport d'eau douce ponctuel important, présente des dérives eulériennes quasiment nulles (Fig. 8). Cependant, la carte des débits résiduels met en évidence une hydrodynamique complexe pour le reste de la zone. La plupart d'entre elles peuvent s'expliquer soit par l'obstacle que représente le port de Mesquer à l'entrée des

traicts de Pen-Bé, soit par les aspérités rocheuses de la bathymétrie présentes le long du littoral (Fig.8, et Annexe 3, Fig.2).

Le transport à l'intérieur du traict est dominé, quant à lui, par l'écoulement de l'étier de Pont d'Arm (Fig. 9, et Annexe 2, Fig.5), qui est le cours d'eau principal alimentant le traict de Pen-Bé.



On trouve également les courants les plus forts le long de l'étier principal du traict de Pen-Bé. Les circulations sont régulières durant la marée, sans apparition de tourbillon majeur. Une asymétrie des courants existe également dans ce secteur, avec des vitesses plus grandes au cours du jusant.

Figure 8. Débits résiduels dans le secteur de Pen-Bé, marée de Vive-Eau

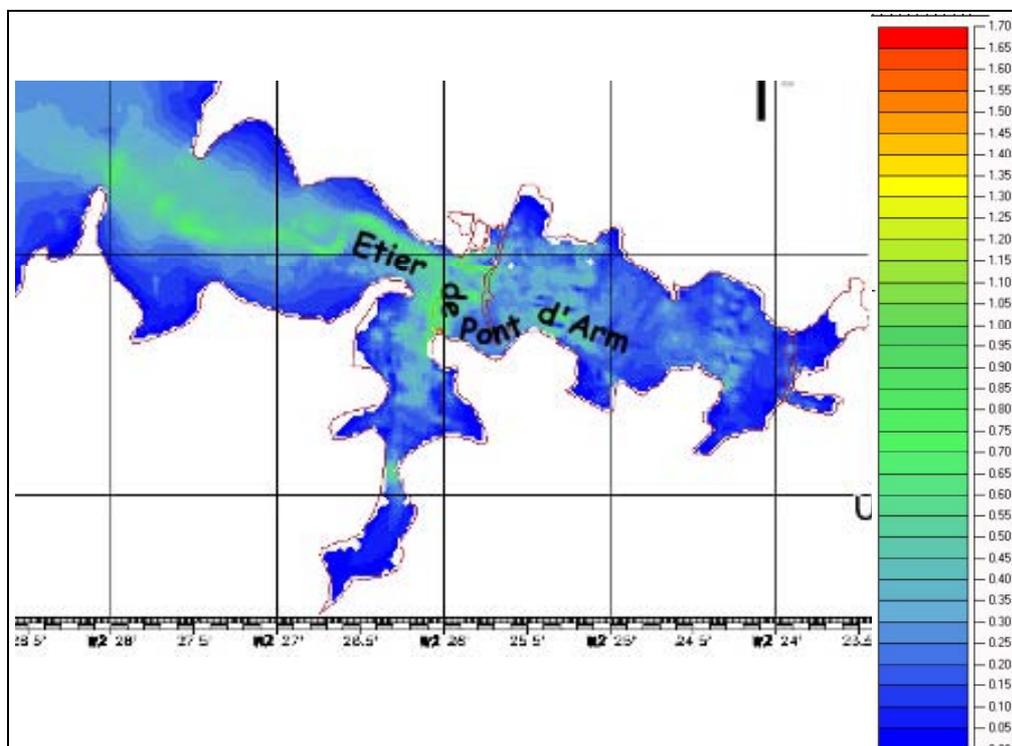


Figure 9. Vitesses Maximales dans le traict de Pen-Bé – MARS-2D (coefficient 95, sans vent)

Une des particularités du site est, en revanche, que les courants dans la baie de Pont-Mahé sont orientés orthogonalement à la côte. La circulation résiduelle y est alors minimale. Les vitesses maximales dans le traict de Pen-Bé sont de l'ordre de 1,3 m/s dans le chenal central et l'étier de Pont d'Arm (Fig.9).

3.2. Influence du vent

Le vent va localement modifier les courants et constitue pour cette raison un paramètre important pour la dispersion des polluants qui est abordée ultérieurement. Son action est proportionnelle au carré de sa vitesse et dépend essentiellement de la configuration du site étudié, et en particulier de son exposition au vent.

Un autre phénomène, notamment induit par le vent, est la surcote, c'est-à-dire une élévation du niveau de l'eau due à une dépression et/ou à l'entraînement de la masse d'eau par le vent. Il est essentiellement étudié dans le cadre des Plans de Prévention des Risques contre les Inondations et nous concerne moins ici. Un exemple de ce phénomène est néanmoins illustré en annexe 4. Le calcul nous donne ainsi une surélévation du niveau d'eau de l'ordre de 50 cm à pleine mer, à proximité du port de la Turballe, pour un vent de secteur Ouest-Sud-Ouest de 90 km/h.

La configuration enclavée des traicts du Croisic aura pour conséquence une faible influence du vent sur la répartition des concentrations en substances dissoutes, alors que la partie extérieure des traicts est plus exposée. Cependant, l'action du vent se fait ressentir de manière plus importante en eaux peu profondes, et le modèle permet d'avoir une idée plus précise de l'impact de ce facteur météorologique. Ce point est illustré dans le chapitre dédié à la diffusion des polluants.

Du fait de sa large ouverture vers le large, la zone de Pen-Bé est plus exposée aux vents qui constitueront donc un facteur essentiel dans l'étude la dispersion des polluants dissous.

3.3. Volumes oscillants et renouvellement des masses d'eau

Les modèles hydrodynamiques permettent également de connaître le volume d'eau transporté sur un cycle de marée.

Ainsi, le calcul des volumes oscillants, effectué sur les sections d'entrée de chaque site, donne des valeurs comprises entre 5 Mm³ (Millions de mètres cubes) en période de morte-eau pour le site de Pen-Bé, et 20 Mm³ en période de vive-eau pour le site du Croisic (tab. 1). Ces volumes d'eau sont donc comparables à ceux qui transitent par un fleuve du gabarit de la Vilaine (débit moyen d'environ 100m³/s) sur une période de deux jours.

tableau 1. Volumes oscillants calculés pour les zones des traicts du Croisic et de Pen-Bé en périodes de morte et vive-eau

Volume Oscillant (Mm ³)	Coefficient de Marée	
	45	95
Traicts du Croisic	11	20
Traicts de Pen-Bé	5	10

La modélisation indique que le renouvellement tidal du à la marée dans les deux sites d'étude n'est que partiel puisque les eaux du large se mélangent à celles qui sont sorties du traict au jusant précédent. Une bonne partie du volume d'eau sorti lors du jusant est ainsi

réintroduite dès le flot suivant. L'étude du renouvellement des masses d'eau s'est basée sur le suivi par le modèle, pendant plusieurs jours, de la dilution d'un polluant introduit dans les traicts.

Dans les traicts du Croisic, une simulation d'un mois (Avril 2004), pour lequel les coefficients de marée varient entre 32 et 107, a été réalisée afin d'évaluer le taux de renouvellement.

Deux rejets stationnaires d'un traceur conservatif, d'une durée de 24h, ont été simulés dans les Petit et Grand Traicts jusqu'à contamination homogène de la zone. A partir de cette situation d'homogénéité, les rejets ont été arrêtés et on a calculé en chacun des points REMI (Fig.10) le rapport des concentrations obtenues aux différentes « pleine mer » successives :

C_n/C_{n-1} , où C_i est la concentration à la pleine mer numéro i . On en déduit le taux de renouvellement par cycle de marée (pleine mer + basse mer) pour chaque point.

Les taux de renouvellement calculés s'échelonnent de 7% pour Sissable, à près de 16% aux Barres de Pen Bron, ce qui est un résultat cohérent avec la position respective de ces points. Les points situés à l'entrée des traicts verront, en effet, leurs eaux se renouveler plus facilement que celles des points plus enclavés.

Ces taux de renouvellement par cycle de marée – pourtant calculés en des points fortement soumis au brassage par les courants de marée – sont faibles par rapport à l'étude de Ponthoreau (1987). En effet, cette étude, basée sur la

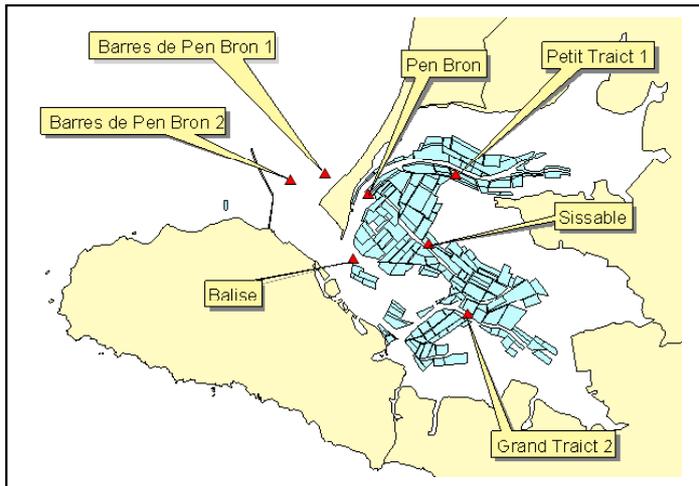


Figure 10. Points de surveillance REMI et cadastre conchylicole dans les traicts du Croisic.

détermination des gradients hydrologiques et phytoplanctoniques et de la distribution zonale des organismes benthiques à l'intérieur des traicts, permet à l'auteur d'évaluer ce taux pour les traicts du Croisic, à 2/3 en périodes de vive-eau, contre 1/3 pendant celles de morte-eau.

Par ailleurs, les résultats exposés plus haut semblent indiquer que le renouvellement des eaux des traicts du Croisic se fait à partir des eaux en provenance de l'Ouest et du Sud. La qualité des eaux du Croisic est donc certainement dépendante de celle des eaux en provenance de la Loire (cf. § 3.5).

Dans le secteur de Pen-Bé, plus ouvert sur l'océan, une simulation sur 20 jours, à coefficients de marée réels, a été effectuée, en reproduisant le même type de rejet stationnaire qu'au Croisic, en amont et au centre du traict, afin de suivre la dilution de cette pollution dans la zone d'étude.

Les coefficients de dilution varient de 2 au centre des traicts à 31 près du port de Mesquer, en passant par 5 au fond du traict. Les taux de renouvellement correspondants sont, respectivement, de 10%, 39% et 22%. Ces chiffres sont à manipuler avec précaution puisqu'il ne s'agit que de moyennes calculées ponctuellement aux points REMI (Fig.11).

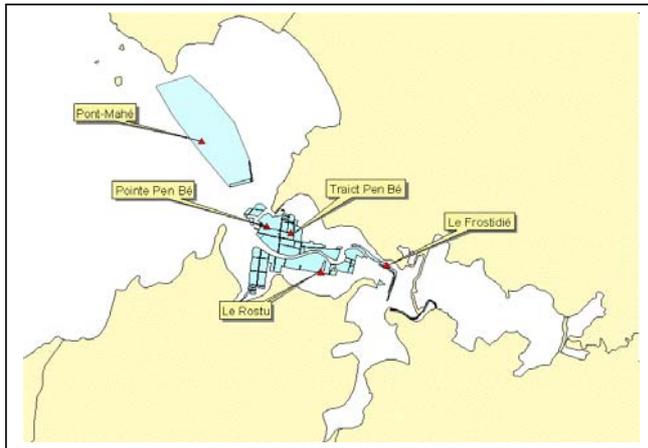


Figure 11. Points de surveillance REMI et cadastre conchylicole dans les traicts de Pen-Bé

Compte tenu de sa morphologie « en entonnoir », le traict de Pen-Bé présente donc une meilleure capacité de renouvellement que les traicts du Croisic ; les résultats, ramenés à un taux de renouvellement pour 5 cycles de marée, sont résumés dans le tableau 2.

tableau 2. Taux de renouvellement locaux et moyens calculés aux points REMI dans les zones des traicts du Croisic et de Pen-Bé

Taux de renouvellement au bout de 5 cycles de marée	
<i>Traicts du Croisic</i>	30% ~ 58%
<i>Traicts de Pen-Bé</i>	41% ~ 92%

Il s'agit donc de taux relativement importants, qui ne représentent néanmoins que des valeurs locales, et en aucun cas une valeur représentative du renouvellement global de chacun des sites. Ces valeurs indiquent en revanche un bon renouvellement des eaux aux points de suivi du réseau de surveillance de la qualité bactériologique des zones conchylicoles des deux sites d'étude.

Le taux de renouvellement n'a pas été étudié pour les eaux de l'estuaire de la Vilaine. Les résultats seraient faussés par l'approximation 2D du modèle.

3.4. Influence des étiers

Dans les traicts du Croisic, les étiers sont de petite taille, avec des débits n'excédant pas 0,3 m³/s sur la période étudiée. Leur rôle se fait essentiellement ressentir à marée basse. Ils permettent alors à la pollution de se diffuser et d'irriguer l'ensemble du traict lorsqu'il est découvert, étendant ainsi largement la zone d'impact couverte par chaque affluent. Les eaux de la Loire, dont les débits peuvent dépasser 5000 m³/s lors de fortes crues, contribuent également à abaisser la salinité dans les traicts du Croisic et peuvent contribuer à l'apport de diverses substances dissoutes (§ 3.5).

Sur un cycle de marée complet, les apports en eau douce représentent moins de 0,1% des volumes oscillants pour les traicts du Croisic et de 2% pour le traict de Pen-Bé, d'où des conséquences sensiblement différentes aussi bien au niveau de l'hydrodynamique que de la salinité dans ces secteurs. L'impact hydrodynamique des étiers est en effet négligeable dans les traicts du Croisic, contrairement à celui de l'étier de Pont d'Arm et de la Vilaine sur le traict de Pen-Bé.

3.5. Influence de la Loire sur les traicts du Croisic

L'étude des apports de la Loire est un aspect d'autant plus important que le renouvellement des masses d'eau des traicts du Croisic se fait en partie avec des eaux en provenance de l'estuaire de la Loire, et probablement de la Vilaine en fonction des conditions météorologiques (cet aspect n'est pas étudié ici). Une contamination des eaux ligériennes a donc un impact inévitable sur ce secteur. La modélisation permet d'identifier les sources potentielles de pollution et d'évaluer l'influence respective des apports marins et terrestres sur la zone étudiée. Cette séparation ne peut être simplement obtenue par des mesures *in situ*, qui fournissent un niveau de pollution global.

Une première estimation sommaire avait été tentée en 2004 (Jeanneret *et al.*, 2004) à partir d'une étude réalisée par l'Ifremer de décembre 1997 à février 1999. Cette étude portait sur la quantification des apports annuels de la Loire en produits phytosanitaires à l'état dissous (Tronczynski et Moisan, 1999). Les prélèvements étaient réalisés deux fois par mois et avec une fréquence plus grande lors des périodes de crues ; sur la période considérée, les débits de la Loire à Montjean variaient de 136 à 3390 m³/s. Les matières actives recherchées étaient au nombre de 75 et certains pesticides ont été observés de façon systématique tout au long de l'étude (atrazine, simazine, métolachlor, alachlore,...).

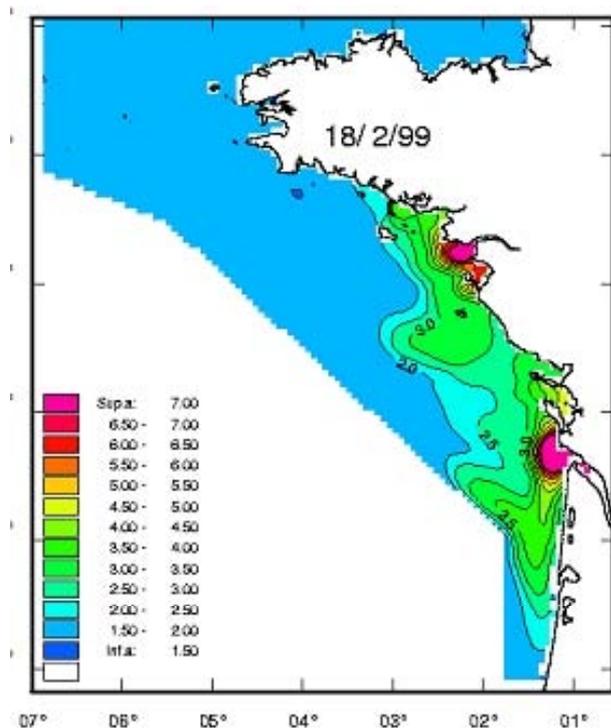


Figure 12. Evolution des concentrations en atrazine (ng/l) au large de l'estuaire de la Loire en février 1999

A partir des concentrations mesurées et des débits de la Loire, les flux instantanés et annuels ont pu être calculés pour les matières actives recensées dans l'étude. Une simulation du devenir de l'atrazine au débouché de l'estuaire de la Loire et de la Gironde a été entreprise sur la période correspondant à la crue de février 1999 (Fig. 12) ; elle montre que dans ces conditions hydrométéorologiques les concentrations en atrazine les plus élevées se retrouvent au large de St Nazaire et du Croisic et varient autour de 5-10 ng/L (0.005-0.01 µg/L), ce qui est largement inférieur à la norme de qualité environnementale (NQE) qui devrait être appliquée prochainement à l'atrazine (600 ng/L).

Dans l'immédiat, compte tenu des outils qui sont à notre disposition, il est difficile de vérifier si l'influence locale est prépondérante sur l'influence marine. En effet, le modèle hydrodynamique utilisé pour évaluer le devenir de l'atrazine apportée par la Loire s'étend à l'ensemble du golfe de Gascogne, et possède des mailles de grande taille (5 km X 5 km).

Chaque valeur d'atrazine correspond à une moyenne sur une surface de 25 km², et ce modèle n'est pas assez fin pour décrire correctement le flux d'atrazine qui entre dans le traict du Croisic, pour lequel nous avons mis en place un modèle à mailles de 30m.

Enfin, certaines conditions météorologiques peuvent induire un déplacement du panache vers le sud ; les contaminants rejetés par la Loire peuvent mettre, dans ces conditions, plusieurs semaines à arriver devant le traict du Croisic.

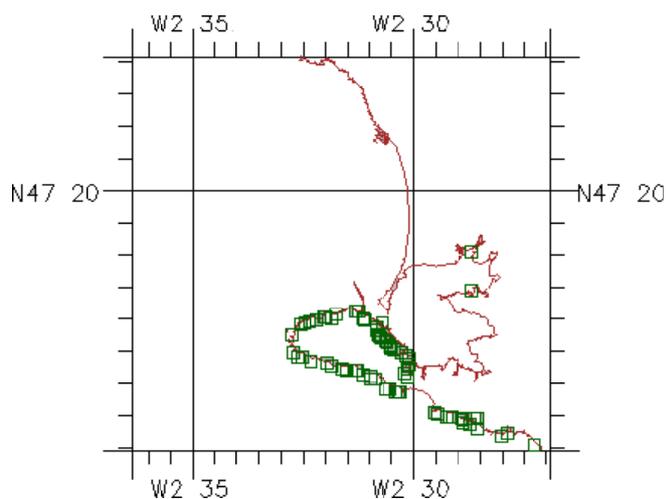
Ceci implique de faire tourner le modèle sur des durées plus longues (quelques mois). Ce qui, sur l'ensemble du golfe de Gascogne, est possible à un coût raisonnable avec des mailles de grande taille, est irréalisable avec des mailles de 30 m de côté.

C'est pourquoi, à la demande des membres du Comité Scientifique et Technologique, on a tenté en 2005 d'affiner cette approche en utilisant les outils existants pour évaluer les apports de la Loire grâce à une méthode indirecte. Elle consiste à comparer les apports respectifs en eau douce et à les rapporter à des concentrations en substances dissoutes.

On utilise pour cela les données de salinité du réseau de surveillance phytoplanctonique de l'Ifremer (REPHY) que l'on va comparer à celles calculées par le modèle à mailles fines du Croisic. Pour une période donnée, le modèle nous fournit l'estimation de la salinité liée aux apports locaux d'eau douce sur la zone. La salinité réelle, connue au point de suivi de l'Ifremer, est le reflet de ces apports locaux et des apports de la Loire ; La différence entre la salinité mesurée par le REPHY et la salinité calculée par le modèle permet d'évaluer la part de la Loire dans la dessalure. La différence des deux permet d'évaluer les apports marins, que l'on compare alors aux apports terrigènes.

Cette évaluation des apports d'eau douce d'origine marine au point de suivi REPHY *Le Croisic* revient à calculer un facteur de dilution applicable à n'importe quelle substance dissoute (à l'instar de l'eau douce) dont on connaît la concentration dans la partie amont de l'estuaire de la Loire.

Une simulation sur 30 jours permettant d'obtenir une carte de salinité moyenne locale (Fig.14) a été effectuée dans ce but. Les conditions environnementales (marée et vent) correspondent à celles du mois d'avril 2004 (du 02/04 au 02/05). Les sources d'eau douce utilisées correspondent aux étiers principaux des traicts, ainsi qu'aux rejets d'eaux pluviales, surveillés par le Service Maritime et de Navigation (SMN) de St Nazaire (Fig. 13). Un débit constant, égal à 10L/s, a été choisi pour ces rejets.



Un premier constat est que le rapport obtenu entre apports d'eau douce d'origine marine et continentale dans les traicts du Croisic dépend avant tout de l'endroit où l'on se situe dans les traicts. En effet, les étiers n'exercent pas la même influence selon que l'on se place le long des chenaux principaux, au fond des traicts ou à leur entrée.

Figure 13. Rejets d'eaux pluviales suivis par le SMN et introduits dans le modèle

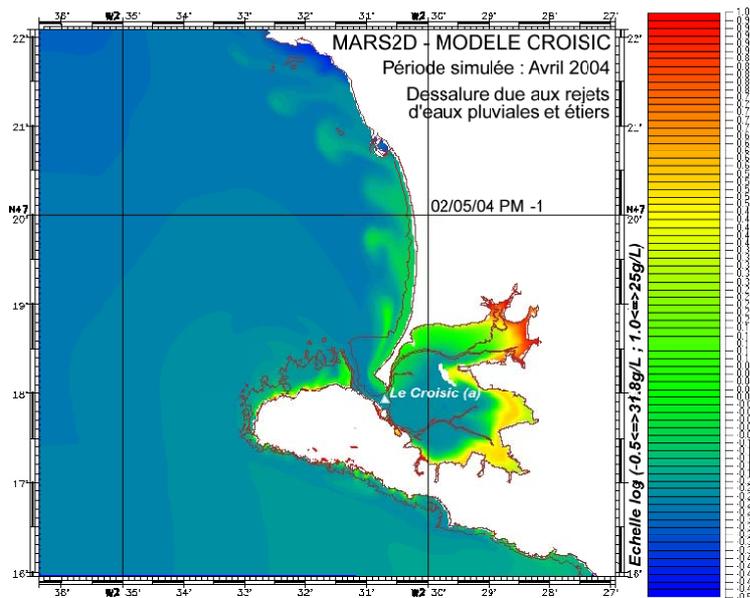


Figure 14. Carte de dessalure du secteur du Croisic due à l'hydrologie locale

Au point de suivi REPHY Le Croisic (Fig.14), on peut, suite à cette simulation, estimer que 75 à 90% de l'eau douce présente dans les traicts du Croisic provient de l'estuaire de la Loire en avril 2004. Il s'agit donc d'un apport considérable, qui signerait un impact prépondérant si les concentrations en polluants dissous dans l'eau de la Loire étaient du même ordre de grandeur que celles mesurées dans les étiers.

Il est important de noter que les apports marins dans les traicts du Croisic n'ont été évalués qu'en un point, qui plus est situé en zone de transition, et pour une période hydrologique

donnée. On peut néanmoins retenir de cette étude les points suivants :

- la zone d'influence des étiers sur la qualité de l'eau des traicts du Croisic est limitée, en espace et en temps. Mais les apports locaux restent certainement prépondérants à l'intérieur des traicts.
- de plus, l'impact de la Loire (comme celui de la Vilaine dans le traict de Pen-Bé) ne se fera ressentir que pour des polluants stables à l'échelle du mois et en milieu marin. Une pollution bactériologique d'origine ligérienne des traicts du Croisic peut donc être écartée, de même que certains composés chimiques tel que la simazine, herbicide rapidement décomposé lorsqu'il est exposé aux ultraviolets.
- enfin, les concentrations en substances dissoutes et particulières vont varier au cours d'une période de crue et seront décalées dans le temps par rapport aux apports dus aux lessivages du bassin versant guérandais. L'estimation des apports respectifs en diuron par la Loire et les étiers sera étudiée au chapitre sur les phytosanitaires.

3.6. Influence de la Vilaine sur le traict de Pen-Bé

Le traict de Pen-Bé reçoit les apports de la Vilaine et de l'étier de Pont d'Arm dont les débits, en périodes de fortes pluies, peuvent atteindre respectivement 1300 m³/s (données IAV) et 10 m³/s (Perdigão-Vasconcelos, 1992).

Contrairement à l'estuaire de la Loire qui, du fait de son étendue et de son fonctionnement complexe, a été exclu du modèle 2D du Croisic, l'estuaire de la Vilaine est inclus dans le modèle 2D de Pen-Bé. Bien que la nature même du code de calcul MARS-2D en fasse un outil inadapté à la description des phénomènes tridimensionnels qui se produisent dans l'estuaire, nous l'avons utilisé pour évaluer de façon préliminaire l'impact respectif de la Vilaine et de l'étier de Pont d'Arm sur le traict de Pen-Bé.

L'évacuation des eaux du bassin versant de la Vilaine est conditionnée par les lâchers d'eau au niveau du barrage d'Arzal, qui limite également la remontée des eaux marines. L'impact hydrodynamique de la Vilaine va se ressentir essentiellement dans la zone de l'estuaire, où les courants moyens et les trajectoires sont particulièrement perturbés en période de crue.

L'Institution d'Aménagement de la Vilaine (IAV) réalise des mesures régulières de nitrate, ammonium, et divers pesticides dans les eaux de la Vilaine qui servent à l'alimentation en eau potable du secteur (usine de Férel, Morbihan). La connaissance des débits journaliers de la Vilaine permettra donc de calculer, pour les paramètres existants, les flux moyens (Annexe 5) et de les injecter dans le modèle de Pen-Bé afin d'évaluer l'incidence de la Vilaine sur le traict.

Deux sources de données sont disponibles pour les débits : l'IAV (<http://www.lavilaine.com>), et la banque HYDRO du Réseau National des données sur l'Eau (<http://www.rnde.tm.fr>). Après un examen minutieux, nous avons choisi d'utiliser les données de l'IAV (annexe 6).

L'influence de l'apport massif d'eau douce par la Vilaine est mise en évidence sur les figures 1 à 3 de l'annexe 7. Les résultats de deux simulations en un point de l'estuaire y sont comparées. Les débits utilisés sont, respectivement, de 30 m³/s en étiage et 1000 m³/s en crue. On observe une nette modification des vitesses de flot – atténuées (jusqu'à 0,15 m/s) – et de jusant – accrues – (Fig. 15 & annexe 7 - Fig.1), ainsi qu'un retard à la renverse jusant-flot (en période de crue) de l'ordre d'une demi-heure.

L'avance, lors du passage au jusant, est plus importante, de l'ordre d'une heure et demie (Annexe 7 - Fig.2). Enfin, l'influence de la Vilaine est peu ressentie sur la variation de la hauteur d'eau au cours du cycle de marée (Annexe 7 - Fig.3). Elle est de l'ordre de quelques centimètres (5 cm à pleine mer).

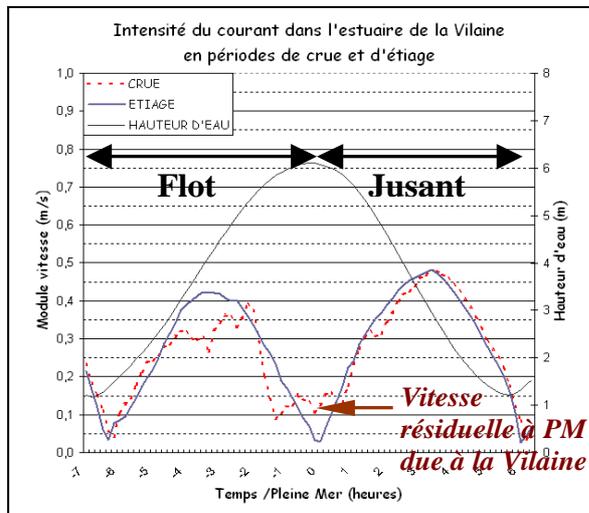


Figure 15. Module du courant dans l'estuaire de la Vilaine en période de crue et d'étiage

L'étude des courants résiduels montre une hydrodynamique complexe dans ce secteur. Sous certaines conditions de vent, notamment pour des vents de secteur Nord-Ouest à Sud-Ouest, un panache de polluant va pouvoir évoluer le long de la côte entre Pen-Bé et l'estuaire de la Vilaine. Cependant, plusieurs simulations ont montré que cet échange entre les deux zones est fortement dépendant de la direction du vent.

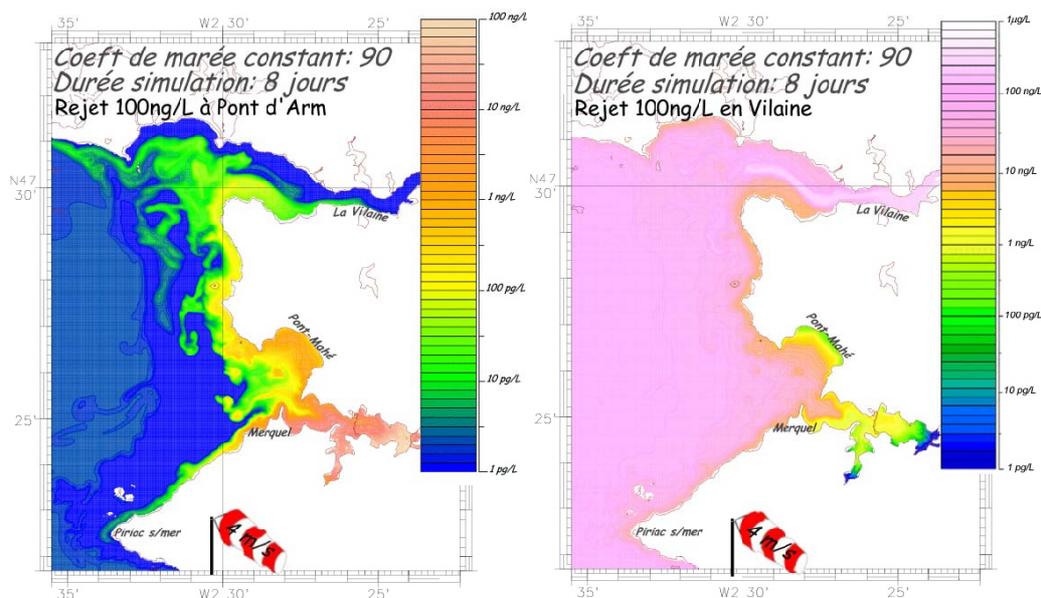


Figure 16. Impact respectif de l'étier de Pont d'Arm et de la Vilaine à flux constant (concentrations moyennes au bout de 8 jours), en période de crue, vive-eau moyenne.

Une simulation a été effectuée à concentration constante au cours du temps et égale à 100ng/L pour la Vilaine comme pour Pont d'Arm (Fig. 16). Les débits utilisés correspondent à des valeurs mesurées en période de crue. Ils sont de 1300 m³/s pour la Vilaine et de 2m³/s pour l'étier de Pont d'Arm.

Les facteurs de dilution observés sont de l'ordre de 100 à 1000 dans chaque cas. Cependant, compte tenu de la différence des débits, la zone d'impact de la Vilaine est bien plus étendue que celle de l'étier de Pont d'Arm et les premières traces de substances dissoutes sont perceptibles dans le traict une douzaine d'heures seulement après leur largage au niveau du barrage d'Arzal.

Les simulations réalisées en période de crue et d'étiage, et en faisant varier les conditions météorologiques, montrent que les zones d'influence de chaque source d'apport ne sont pas exactement les mêmes. Ainsi, la qualité de l'eau à l'amont de la zone des traicts est gouvernée par celle de l'étier de Pont d'Arm (peu d'influence de la Vilaine), tandis que celle de la zone aval (y compris la Baie de Pont-Mahé) se trouve sous l'influence principale de la Vilaine.

De plus, la position des zones les plus impactées varie avec la marée. Ainsi, l'entrée des traicts, qui constitue véritablement une zone de transition entre les deux influences étudiées (bassin versant du Mès et Vilaine), est fortement soumise à la qualité de l'eau de l'étier de Pont d'Arm à l'étales, tandis que la Vilaine impose la qualité de son eau à pleine mer.

Par ailleurs, les période de vives-eaux favorisent le transfert des polluants entre l'estuaire et les traicts de Pen-Bé.

L'impact, bien réel, de la Vilaine dépend fortement des conditions météorologiques, de marée et bien entendu de débit. Cependant, sa zone d'influence reste limitée à l'entrée des traicts et à la baie de Pont-Mahé. Il s'agit donc d'un résultat analogue à celui présentant l'impact de la Loire sur la qualité des eaux des traicts du Croisic.

Comme pour la Loire, l'estimation des apports respectifs en phytosanitaires par la Vilaine et les étiers sera étudiée au chapitre 3, paragraphe 4.3.

L'impact hydrodynamique des affluents s'avère être négligeable sur le secteur du Croisic, contrairement à celui de l'étier de Pont d'Arm et de la Vilaine sur leurs zones respectives.

D'autre part, d'importantes circulations résiduelles ont pu être mises en évidence sur chacun des deux sites, qui permettent de mieux appréhender la problématique du renouvellement de leurs eaux.

4. Cartographie des peuplements benthiques

Dans le cadre de la mise en place du réseau de surveillance benthique REBENT (<http://www.ifremer.fr/rebent/index2.htm>), le secteur du Croisic a fait l'objet de plusieurs campagnes d'échantillonnage destinées à élaborer une cartographie des peuplements benthiques. Le suivi de ces peuplements au cours du temps permettra de détecter d'éventuels changements d'origine naturelle ou anthropique.

Les principales unités morphosédimentaires ont été déterminées grâce à l'analyse de photographies aériennes (orthophotographies littorales réalisées en 2000) et de données acquises au cours d'une campagne topographique Lidar (chapitre 2, paragraphe 5.2).

Des analyses granulométriques ont ensuite permis de décrire les faciès sédimentaires présents dans les traicts du Croisic. La succession des faciès dans les traicts témoigne d'un gradient granulométrique non négligeable : d'un mélange de graviers et de sables grossiers et moyens (80 à 90% des diamètres compris entre 0,5 et 1mm à l'entrée du chenal de Pen-Bron ; Sogreah, 1997) au niveau des chenaux d'entrée (fortes vitesses), on passe progressivement à des dépôts sablo-vaseux puis à des vases ($D < 63\mu\text{m}$) au niveau des entrées des étiers. Ces résultats confirment les observations relatives à la courantologie du secteur, un courant fort entraînant avec lui les particules les plus fines pour ne laisser que le matériau le plus grossier (phénomène de pavage). Les particules fines témoigneront donc a contrario de zones de calme ; elles auront par ailleurs une plus grande capacité de rétention des substances polluantes hydrophobes.

Ces résultats ont été complétés par des échantillonnages sur le terrain, afin de préciser les caractéristiques morphosédimentaires et de repérer les limites des formations végétales. En définitive, le croisement des données issues des orthophotographies littorales, de la campagne topographique LIDAR et des campagnes sur le terrain a contribué à mettre en évidence la zonation du schorre⁴ et à préciser la répartition des macroalgues et des herbiers de *Zostera noltii*, qui peuvent être largement recouverts d'entéromorphes (Bonnot-Courtois *et al.*, 2005).

Ce type de cartographie (Fig. 17) n'existe pas actuellement dans le secteur de Pen-Bé ; toutefois, CAP Atlantique prévoit son élaboration dans le cadre de la réalisation du document d'objectifs pour le site Natura 2000 « Marais du Mès, baie et dunes de Pont Mahé, étang du Pont de Fer ».

⁴ Schorre : nom flamand des prés salés ou des marais maritimes, utilisé dans le langage morphologique des environnements littoraux tempérés (glossaire Ifremer, <http://www.ifremer.fr/envlit/glossaire>)

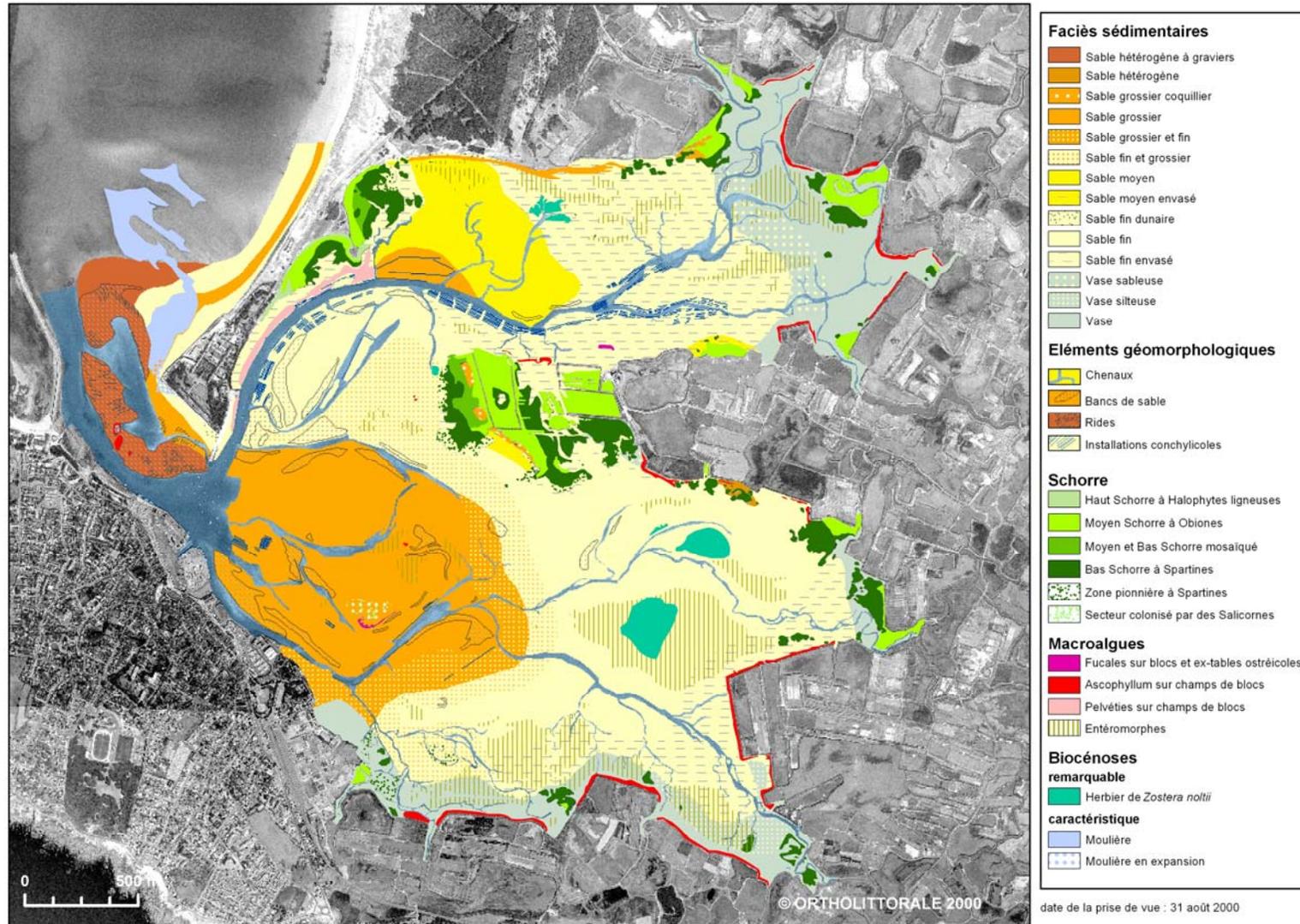


Figure 17. Cartographie bio-morpho-sédimentaire de l'estran meuble du Croisic (Bonnot-Courtois *et al.*, 2005).

Chapitre 2 - Outils et développements méthodologiques nécessaires au programme

Compte tenu de la spécificité de la zone étudiée, et du peu de connaissances disponibles sur ce secteur, la mise au point d'outils permettant de répondre aux objectifs fixés a constitué une part importante du programme, qui est précisée dans ce chapitre.

1. Mise en place d'une base de données

La création et le développement d'une base de données sur la qualité de l'eau répondent à des attentes multiples :

- forte demande d'information de la part des professionnels du territoire, tributaires d'une bonne qualité de l'eau pour la pérennité de leurs activités. Cette demande a notamment été formulée au cours du CST du programme «Etude des secteurs conchylicoles du Croisic et de Pen-Bé », en 2003.
- besoin d'un outil de gestion des données produites par le laboratoire de Pen Avel entre autres, à l'usage notamment de CAP Atlantique.

L'outil n'a pas vocation à se substituer à d'autres bases de données comme la base Quadrige de l'Ifremer dont les données brutes sont disponibles sur le site <http://www.ifremer.fr/envlit/>. Elle doit plutôt offrir un support informatique, évolutif et performant, aux acteurs locaux et producteurs de données. En effet, ces derniers travaillent sur les sites conchylicoles sans relier pour l'instant leurs observations et résultats d'analyses.

Dans un premier temps, un inventaire a été réalisé, aussi exhaustif que possible, avec notamment toutes les données sur l'eau produites sur le territoire de CAP Atlantique et leurs caractéristiques (ou « métadonnées », Bauer, 2004) :

- nom du réseau et de son opérateur.
- objectif du réseau.
- fréquence des prélèvements.
- paramètres mesurés, unités et techniques analytiques.
- stations suivies et leurs caractéristiques (coordonnées, date de création, photo, etc.)
- format de restitution courant des données, fréquence des mises à jour.

Ces informations sont recensées dans un catalogue des données.

Puis, le Modèle Conceptuel de Données (MCD), qui représente l'organisation logique des données au sein de la base a été réalisé. Cette phase du travail, particulièrement importante, permet de déterminer le squelette de l'outil à développer.

L'ensemble de l'information à intégrer dans la base de données et la manière de la structurer étant alors connus, la construction de la base proprement dite a été lancée avec le logiciel Access 2000®, qui est couplé avec le logiciel Géoconcept pour les cartographies. L'automatisation des sorties graphiques permet une valorisation des informations pour les gestionnaires et les usagers du milieu.

La structure relationnelle de la base (Fig. 18) a été conçue avec le souci de disposer d'un outil évolutif : l'ajout d'une station, d'un paramètre ou d'une nouvelle norme analytique sera tout à fait possible dans l'avenir. Les résultats de la qualité des milieux aquatiques sont

archivés au format normalisé SANDRE⁵, ce qui autorise les échanges de données avec les bases de données existantes, comme l'outil Quadrigé de l'Ifremer.

De plus, cette structure permettra de créer facilement des requêtes thématiques pour l'extraction et l'exploitation futures des données selon différents critères tels que :

- le type de réseau.
- la commune.
- le support analytique (eau, coquillage ou sédiment).
- le site d'étude (Le Croisic ou Pen-Bé).
- les activités concernées en aval des différentes stations (saliculture, conchyliculture, baignades et autres activités nautiques).
- les résultats d'analyses.
- etc.

Enfin, plusieurs formulaires ont été créés pour offrir une interface de saisie et de consultation aux futurs utilisateurs.

Les objectifs de cette base de données sont d'identifier les valeurs de référence, propres au milieu dit « de transition » eaux douces – eaux salées, et qui font souvent défaut lors de l'analyse des résultats. Elle permettra par ailleurs de dégager les tendances à l'amélioration ou la dégradation des milieux aquatiques sur le long terme.

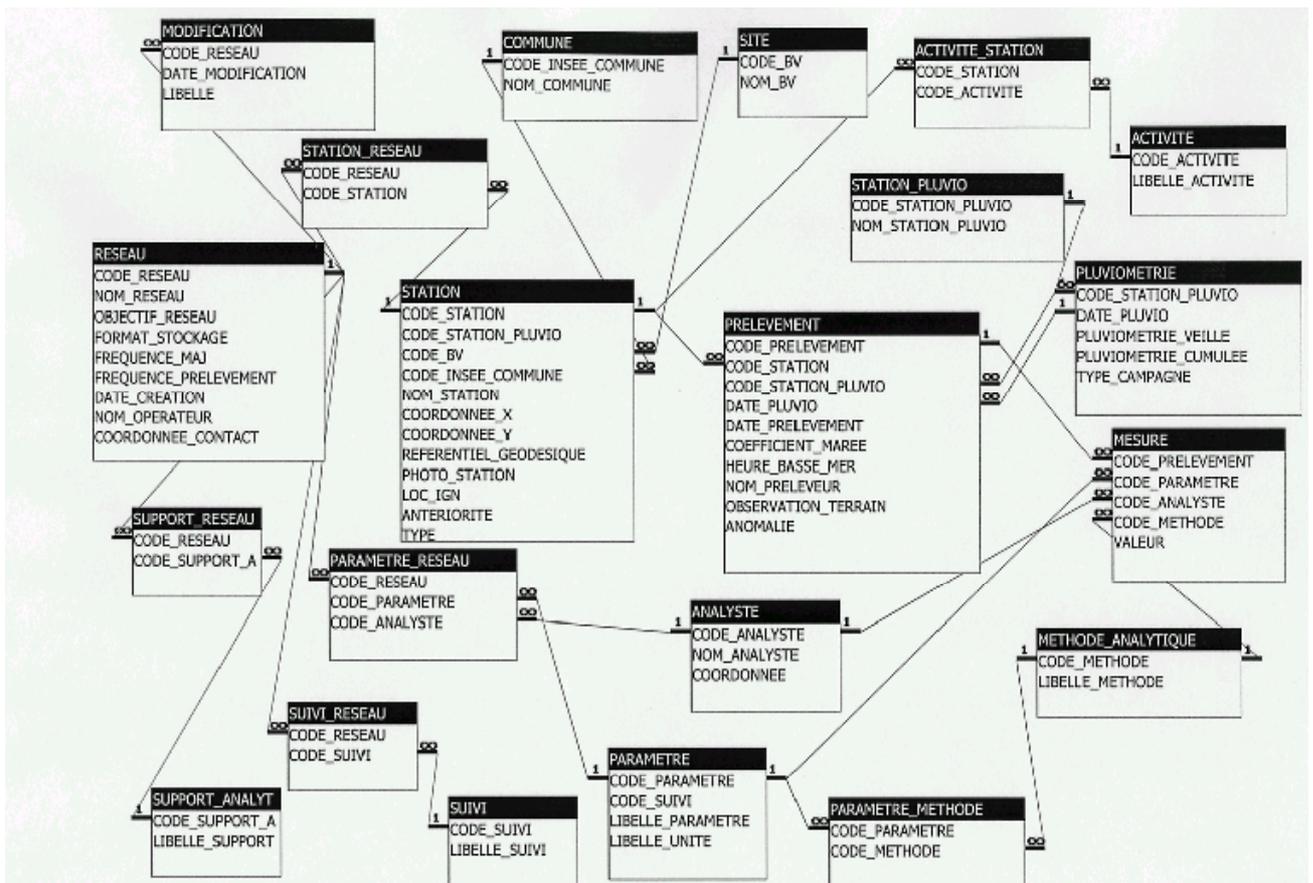


Figure 18. structure relationnelle de la base de données (Bauer, 2004)

⁵ SANDRE : Secrétariat d'Administration Nationale de Données Relatives à l'Eau

2. Système d'Information Géographique

Bien que CAP Atlantique dispose d'informations numérisées sur son territoire, la plupart des données nécessaires à la détermination des risques n'existaient pas ou étaient difficilement disponibles, ce qui a nécessité un long travail de saisie (11500 objets ont été numérisés et intégrés dans le SIG, Lomakine, 2005) et d'interprétation, accompagné de journées de terrain.

Les données utilisées pour la constitution du SIG sont très nombreuses et détaillées dans le tableau 3 :

- un Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'une résolution de 50 m obtenu auprès de l'IGN (BD Alti) ;
- la géologie obtenue à partir des cartes géologiques du BRGM ;
- la pédologie obtenue à partir de la Chambre d'Agriculture et de travaux bibliographiques ;
- les usages du sol détaillés obtenus à partir de photographies aériennes et de travaux de terrain ;
- les données hydrographiques obtenues à partir des cartes IGN, de photographies aériennes et de travaux de terrain ;
- la localisation des haies obtenue à partir de photographies aériennes ;
- les données agricoles par commune obtenues à partir du RGA ;
- les mesures en *Escherichia coli* sur des exutoires de bassins versants obtenues auprès de la DDASS ;
- les mesures en NO₃ et PO₄ de Pen Avel obtenues auprès du laboratoire de Cap Atlantique ;
- la base de données cartographiques BD Carto obtenue auprès de l'IGN.

Le MNT permet de calculer des directions de flux, de calculer des intensités de pentes, et de déterminer les zones potentiellement saturées.

Grâce à la base de données sur les usages du sol, la pédologie, le réseau de haies et les cours d'eau, on peut décrire précisément les usages, déterminer les zones sensibles au ruissellement, et localiser les zones permettant de temporiser les pollutions.

Enfin, le couplage du MNT avec les couches d'informations permet de déterminer les zones en contact direct avec les cours d'eau et les zones à risque de pollution aussi bien à l'échelle du bassin versant que de la parcelle.

L'évaluation des risques de pollutions à partir du SIG a été déterminée à partir de trois méthodes et à deux échelles différentes : le bassin versant et la parcelle. La première méthode employée pour définir le risque de pollution sur un bassin versant est celle de Laurent (1996). Elle consiste à évaluer les apports en azote et en phosphore par sous-bassin versant grâce aux données du Recensement Général Agricole (RGA) et à l'inventaire de l'occupation du sol. La deuxième méthode développée par Aurousseau *et al.* (1998) est l'évaluation du risque parcellaire de contamination des eaux superficielles par les pesticides. Cette approche utilise une méthode de hiérarchisation des facteurs de risques en fonction de critères afin de classer chaque parcelle dans un rang de risque. Cette méthode a également été appliquée à l'échelle du bassin versant, mais avec l'utilisation d'un nombre moins important de paramètres. La dernière méthode utilisée est celle de Bolo et Brachet (2001). À l'échelle de la parcelle, elle est le produit du croisement des pentes, des types de terrain, du type d'usage, du degré d'hydromorphie du sol avec les zones sensibles qui ne constituent pas d'obstacles aux écoulements comme le réseau de haies et les environnements protégeant les cours d'eau.

Ces trois méthodes sont largement détaillées dans le travail de Lomakine (2005) ; seules les grandes lignes en sont reprises ici.

tableau 3. Inventaire des données utilisées dans le SIG d'évaluation des risques (Lomakine, 2005)

THEMES	DONNEES DE BASES	INTERETS	SOURCES	ORIGINES
Fond de carte	Réseaux routier, ferré, hydrographique bâtiments végétation toponymie limites administratives altimétrie	Référentiel Précision pour la localisation Limite marais Réseau hydrographique	BD TOPO BDCARTO Carte 1/25 000	IGN
Géologie Pédologie	Couches géologiques nature du sol	Nature de la roche Caractéristiques des sols Granulométrie, porosité...	Carte géologique Carte pédologique	BRGM Chambre d'Agriculture
Occupation de la conchyliculture dans les Traicts	Concession, nature des élevages. Biomasse coquillages Mode, type de culture Croissance coquillages	Dynamique de l'espace. Répartition selon la taille des exploitations... Gestion Détermination des stocks	Cadastre conchylicole	DDAM, IFREMER
Occupation du sol	Zone urbaine Zone agricole Prairie Forêt Plan d'eau Zone humide	Dynamique de l'espace Gestion de l'espace... Potentiel et risque de pollution Localisation des zones d'apports de pollution.	Cartes IPLI Terrain Photographies aériennes	DDE Ortholittorale 2000 Interprétation personnelle
Bassin versant	Limites des bassins Caractéristiques morphologiques Réseau hydrographique Apports des bassins	Interaction marais/bassin versant. Déterminer niveaux de pollution	MNT Terrains	BD Alti IGN Interprétation personnelle
Qualité des eaux et des sédiments	Pamètres physico-chimiques	Qualité des eaux du DPM Flux de polluant à l'exutoire Salubrité conchylicole	REMI, REPHY, RNO, suivi des flux et autres	IFREMER Laboratoire de Pen-Avel DDASS Service Maritime
Usages agricoles	Commune SAU Culture Elevage	Apport en azote et phosphore	RGA	DRAF
Réseau de haies	Haies	Interception des polluants	Photographies aériennes	Ortholittorale 2000

2.1. Évaluation empirique des apports agricoles à partir du RGA

L'évaluation des apports d'azote et de phosphore peut se faire à partir du recensement général agricole (RGA). Cette méthode (Laurent, 1996) permet de quantifier les quantités des nutriments (origine organique seulement) apportées aux sols cultivés et pâturés. Les apports en engrais chimiques ne sont pas connus précisément, c'est pourquoi ils ne sont pas pris en compte dans cette méthode, qui reste assez grossière.

Elle consiste, à partir de données du RGA à l'échelle communale, à déterminer les quantités épandues de phosphore et d'azote par l'intermédiaire du fumier et du lisier ou des rejets directs par les animaux à l'échelle du bassin versant. La contrainte du changement d'échelle est contournée grâce au SIG par le référencement spatial des données du RGA. En effet, avec le RGA on connaît la Surface Agricole Utile (SAU) et le nombre d'animaux d'élevage pour une commune. Ces données doivent être distribuées sur les bassins versants grâce aux données d'occupation du sol déterminées à partir des photographies aériennes. Un biais subsiste néanmoins : les données du RGA sont associées à la commune dans laquelle est situé le siège social de l'exploitation. Or, il est fréquent que les parcelles d'une même exploitation soient situées sur plusieurs communes, elles-mêmes pouvant être localisées sur des bassins versants différents. Ainsi, sur une petite commune x comprenant beaucoup de sièges d'exploitation et peu de terres agricoles, avec des cultures qui se font en partie sur une grande commune contiguë y, ceci se traduit par une sur-évaluation des apports par les terres agricoles de la commune x et corrélativement par une sous-évaluation pour les terres agricoles de la commune y.

2.2. Évaluation des risques de transfert de polluant par hiérarchisation de facteurs

Aurousseau *et al.* (1998) ont mis au point une méthode d'analyse des facteurs de risque de transfert des pesticides. Cette méthode permet de calculer un indice de risque (Rang SIRIS) à partir de la hiérarchisation de différents critères (intensité de la pente, distance au cours d'eau,...). Dans le cadre de cette étude, cette méthode a été modifiée à l'échelle du bassin versant en utilisant d'autres paramètres que ceux proposés et en nombre moins important : on a conservé ici le type d'usage, la proportion de pentes supérieures à 5% et la proportion de terrains favorisant le ruissellement. En revanche, à l'échelle de la parcelle, la méthode est rigoureusement conservée et les paramètres sont les mêmes que ceux proposés par Aurousseau *et al.* (1998) pour l'évaluation du risque parcellaire de la contamination des eaux superficielles par les pesticides : distance de la parcelle au réseau hydrographique, pente de la parcelle, longueur de la parcelle, présence de haies ou talus... Les couches d'informations nécessaires pour l'application de ces méthodes à l'échelle du bassin versant ou à l'échelle du parcellaire sont le MNT, les usages du sol, la nature du terrain, le réseau de haies et le réseau hydrographique.

2.3. Évaluation des risques par la méthode de zonage de zones sensibles

L'estimation des risques de pollution diffuse par la méthode d'identification de zones sensibles à l'échelle du parcellaire s'effectue en 3 étapes (Bolo et Brachet, 2001). La première consiste à déterminer la zonation du potentiel de pollution des parcelles en fonction de plusieurs facteurs (pente, texture du sol, hydromorphie, usages). La deuxième étape consiste à définir les zones sensibles qui correspondent aux surfaces reliées directement aux cours d'eau : grâce au modèle numérique de terrain, on prend en compte les haies, les prairies, le réseau hydrographique,... La dernière étape consiste à réunir les deux premières pour enfin obtenir une carte des risques parcellaires définis en 4 classes.

3. Modélisation des apports par les bassins versants

Les informations issues du SIG ont été couplées avec un modèle agro-pédologique (Di Luzio *et al.*, 2002) ; il s'agit du logiciel SWAT® 2000 (Soil and Water Assessment Tool), qui est développé par l'Agricultural Research Service (ARS) de l'USDA (United State Department of Agriculture) et est disponible gratuitement sur <http://www.brc.tamus.edu/swat/index.html>.

Le modèle est conçu pour prévoir l'impact des pratiques de l'occupation du sol sur l'eau, les sédiments et les rendements des apports agricoles sur de larges bassins versants caractérisés par des hétérogénéités spatiales du sol et des usages (Neitsch *et al.*, 2002). Le modèle exige des informations spécifiques (peu nombreuses, mais précises) sur le climat, les propriétés du sol, la topographie, la végétation, et les pratiques résultant des usages sur les bassins versants. Les processus physiques associés avec les écoulements de l'eau, le transport des sédiments, la croissance des végétaux, les cycles des nutriments sont directement modélisés par SWAT® en utilisant ces données en entrée. Le modèle peut également utiliser des données plus spécifiques comme les flux de bactéries en provenance de stations d'épuration par exemple. Mais, il n'est pas conçu pour simuler dans le détail des phénomènes événementiels de crues sur des laps de temps courts.

Dans SWAT®, chaque bassin versant est divisé en un système de bassins versants élémentaires interconnectés. Chaque bassin versant élémentaire est lui-même subdivisé en Hydrologic Response Units (HRU) basées sur la combinaison de l'occupation du sol avec la pédologie afin d'obtenir la plus petite unité homogène pour déterminer le comportement des écoulements. Tous les calculs dérivés des HRU sont totalisés par bassin versant pour obtenir un flux total par bassin versant.

Les données utilisées et nécessaires pour le logiciel SWAT® sont celles qui constituent le Système d'Information Géographique (tab. 3) : Modèle Numérique de Terrain, usages des sols, qualité des eaux,...auxquelles sont adjointes des séries chronologiques météorologiques (Météo France, station de Guérande), et les résultats du fonctionnement des stations d'épuration (Conseil Général 44, SATESE).

L'évaluation des flux polluants à partir de SWAT® nécessite plusieurs étapes préalables (Fig. 19) :

- délimitation des bassins versants élémentaires ;
- définition des HRU, en combinant les données d'occupation du sol avec la pédologie ;
- intégration des données météorologiques (pluviométrie, températures minimum et maximum, intensité du rayonnement, humidité relative, vitesse du vent) ;
- mise en relation des tables d'usages du sol et de la pédologie avec la base de données interne de SWAT® : caractéristiques physiques ou chimiques des sols (épaisseurs des couches, conductivité hydraulique, perméabilité, réserve utile), des bassins versants, des HRU, des chenaux d'écoulement, de la nappe, des pratiques et de la météorologie ;
- gestion et paramétrage des données : pratiques agricoles, coefficients de ruissellement, de percolation de l'azote, d'évapotranspiration, débit d'étiage, largeur et profondeur moyennes des cours d'eau principaux et secondaires, effets de la nappe saturée ;
- exécution du modèle, avec options possibles : choix de la méthode de calcul de l'évapotranspiration, capacité des zones humides à l'épuration, choix du pas de

temps (journalier, mensuel ou annuel)... Les phases du cycle hydrologique sont calculées pour chaque HRU et sont agrégées par bassin versant ;

- représentation des résultats de la simulation, et production de cartes et diagrammes ;
- calage du modèle en fonction des résultats obtenus.

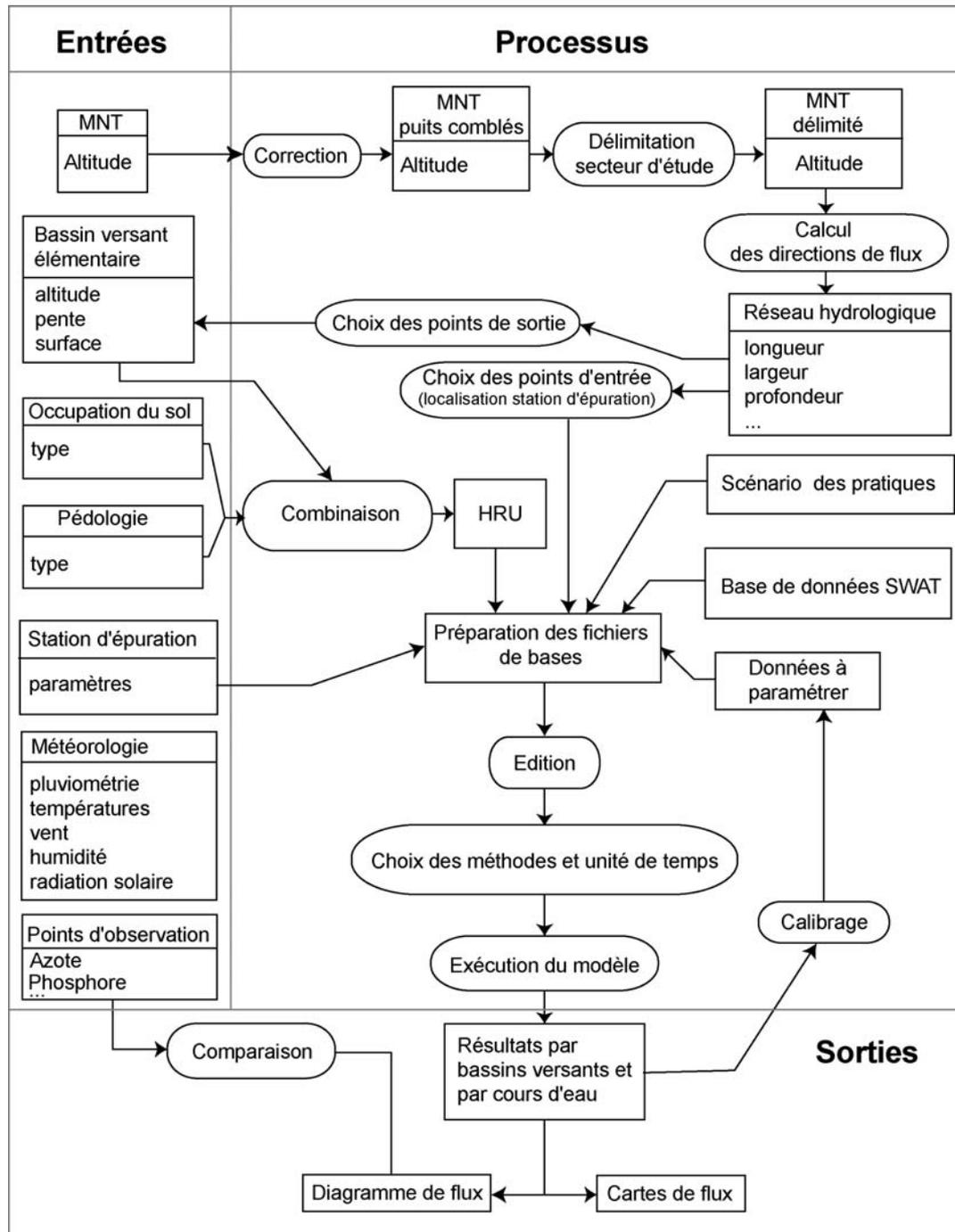


Figure 19. Étapes pour l'évaluation des flux de polluants à partir de SWAT® (Lomakine, 2005)

Le logiciel SWAT® permet de modéliser le devenir des diverses substances utilisées ou produites sur les bassins versants (nitrates, phosphates, bactéries, produits phytosanitaires,...) en fonction des usages du sol. Grâce à ses fonctions, SWAT® permet aussi de distinguer les origines des apports et de déterminer l'intensité des flux entrant et sortant des bassins versants (Bioteau *et al.*, 2002). Cette distinction spatiale permet de connaître le bassin versant élémentaire polluant et la pratique en cause sur un long terme. La possibilité d'établir des scénarios de changements d'état du sol et des pratiques va permettre de sélectionner le meilleur aménagement pour les bassins versants à risque.

4. Estimation des apports par les bassins versants

Les activités économiques des traicts du Croisic et de Pen-Bé (conchyliculture, saliculture, tourisme, etc.) sont fortement tributaires de la qualité de l'eau. Des réseaux de suivi de la qualité de l'eau et des coquillages existent sur les deux bassins versants. Cependant, ils sont à vocation sanitaire ou patrimoniale (réseaux RNO, REMI et REPHY de l'Ifremer, suivi du laboratoire de Pen Avel – CAP Atlantique), voire réglementaire (réseaux de la DDASS ou de la CQEL), et n'ont pas pour objectifs de déterminer les origines de pollutions ou des dysfonctionnements constatés. Pour approfondir les connaissances sur ces deux secteurs et identifier d'éventuelles pollutions, les partenaires du programme ont décidé de réaliser plusieurs séries de mesures dans les étiers, en mesurant un plus grand nombre de paramètres.

4.1. Choix des stations de suivi et fréquence des campagnes

En 2002, un diagnostic a été réalisé sur le bassin versant des traicts du Croisic. Il a permis d'inventorier les sources de pollutions potentielles caractéristiques de ce bassin versant à dominante urbaine (Morin, 2002).

L'état des lieux porte sur les différentes activités identifiées sur le secteur : urbaine, agricole, industrielle/artisanale, et portuaire.

Les sources potentielles de pollution ont été étudiées selon les thématiques suivantes :

- l'état de l'assainissement en presqu'île (dispositif d'épuration, zonage d'assainissement collectif et non collectif, conformités des branchements d'eaux usées des usagers, etc.).
- les apports des activités agricoles, portuaires, industrielles et artisanales (notamment en micropolluants comme les métaux lourds, la bactériologie, etc.).
- l'utilisation de phytosanitaires, insecticides, fongicides par les particuliers, les collectivités, les agriculteurs et autres organismes (DDE, SCNF, Entente Interdépartementale pour la Démoustication).
- les apports drainés par les arrivées d'eaux pluviales et de ruissellement.
- les apports plus ponctuels dus aux activités touristiques (campings-cars, hébergement de vacances, etc.)

Une large consultation a été réalisée, notamment auprès des professionnels, de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne, de la DDASS, du Service Maritime et de Navigation, de la DDE, de la SNCF, des communes, de la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt, de la Chambre d'Agriculture, de la DIREN, de la Chambre de Commerce et de l'Industrie, de l'Institution d'Aménagement de la Vilaine, de l'Entente Interdépartementale pour la Démoustication, du Service Régional pour la Protection des Végétaux, etc.

Cette étude a permis de définir la liste des substances caractéristiques à surveiller et d'élaborer un protocole adapté au suivi des sites conchylicoles (Buchet, 2003). L'année 2003

a eu pour objet de mettre en place ce suivi et de valider ce protocole, malgré les difficultés liées à la sécheresse.

Suite à l'étude réalisée par Morin (2002) et à la méthodologie établie par Buchet (2003), les stations décrites ci dessous ont été identifiées pour le suivi (Fig. 20).

Trois stations (n° 6, 5 et 4) sont réparties de l'amont vers l'aval de l'étier de Lancly qui draine des écoulements provenant du bassin versant de la Turballe : nous visualiserons ici des apports à la fois d'origine agricole et urbaine. Notons que seule la station 6 (Croix de l'Anse – Le Requer) n'est pas soumise à l'influence marine.

Une station se situe à l'exutoire de l'étier de Plinet : ce point de suivi (n° 3) a été retenu car il constitue probablement une source d'apports non négligeable aux secteurs conchylicoles qui se trouvent immédiatement en aval, à partir d'un bassin versant à vocation essentiellement agricole.

Enfin, deux autres stations (n° 1 et 2) se situent sur deux écoulements provenant du bassin versant du Croisic. L'analyse des ces rejets d'eaux pluviales sera riche en enseignements sur la qualité d'apports polluants d'origine urbaine et portuaire (Port du Croisic).

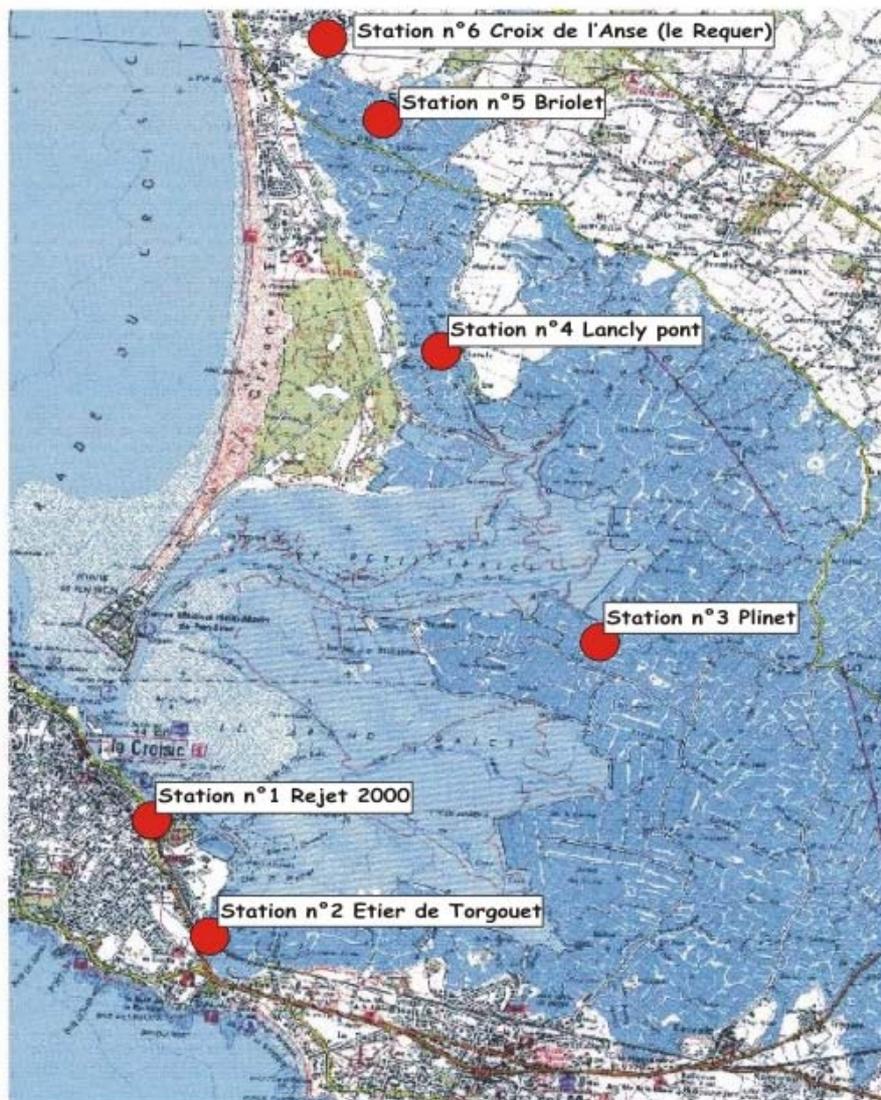


Figure 20. Localisation des points de prélèvements échantillonnés en 2003/2004 dans le secteur du Croisic.

En 2003, compte tenu du déficit pluviométrique et de l'absence d'écoulement dans les étiers, seules 3 campagnes ont pu être réalisées (mai, juillet et novembre) dans les traicts du Croisic ; elles ont permis de vérifier sur le terrain la faisabilité du protocole. En 2004, nous avons réalisé des échantillonnages mensuels sur l'ensemble des points de prélèvement.

La pluviométrie est l'un des facteurs importants à prendre en compte lors des suivis des étiers pour la détermination des teneurs en contaminants. En effet, au cours des épisodes pluvieux, le bassin versant est lessivé, entraînant les substances présentes sur le sol (pesticides, engrais, boues et lisiers) dans les nappes phréatiques et dans les cours d'eau. Dans la mesure où les moyens humains et matériels ne permettaient pas de mettre en place un suivi à fréquence élevée, notre objectif a été avant tout d'approcher les quantités maximales ponctuelles de polluants arrivant dans les traicts à un instant « t », notamment pendant les périodes de forts épisodes pluvieux (pics d'apports).

A partir des études réalisées par la DIREN Bretagne notamment, une forte pluviométrie a été définie comme étant un événement pluvieux d'au moins 10 millimètres en moins de 24 heures. Par ailleurs, l'analyse des données de Météo France sur le secteur d'étude pendant 30 ans a montré que le nombre moyen de jours avec une pluviométrie supérieure à 10 mm est de 2 par mois environ, sauf en avril, mai, juillet et août (1 jour).

Les prélèvements ont donc été réalisés :

- si possible, suite à une forte pluviométrie (>10 mm en 24 h) ;
- à défaut, après un événement pluvieux de 7 à 25 mm de précipitations cumulées sur 3 jours, afin d'estimer les apports chroniques ;
- à marée basse.

Par ailleurs, pour être en mesure d'échantillonner les 6 stations le même jour, les prélèvements ont eu lieu par coefficient de marée supérieur à 75.

Parallèlement, la méthodologie d'inventaire a été transposée facilement au suivi des apports sur le bassin versant du Mès, qui est à dominante agricole.

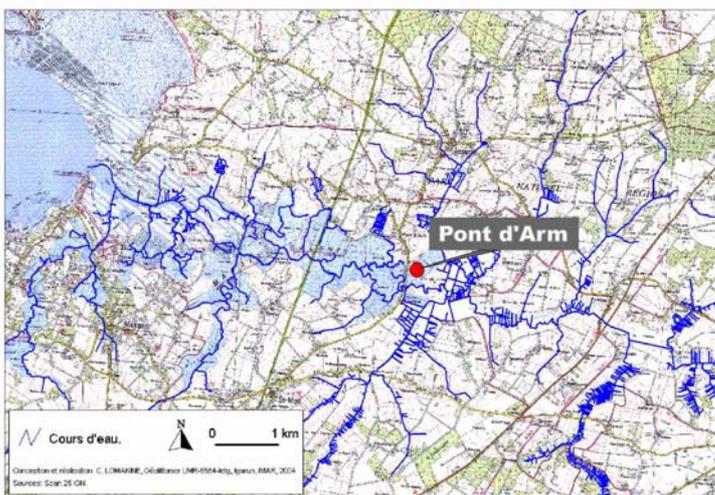


Figure 21. Localisation de la station de suivi de Pont d'Arm

Par comparaison avec les petits étiers qui se déversent dans le traict de Pen-Bé, l'étier du Mès a un débit très important, de 2 m³/s environ, qui peut atteindre jusqu'à 10 m³/s après de fortes précipitations (Perdigão Vasconcelos, 1992). D'autre part, la mesure des débits avec un moulinet n'est pas adaptée à certains étiers de ce bassin versant. C'est pourquoi, dans un premier temps, les mesures de débit et de concentration ont été réalisées uniquement à Pont d'Arm (Fig. 21).

Cette approche préliminaire est confortée par les résultats de la modélisation (cf. chapitre 3), qui montrent que l'essentiel des apports transite par Pont d'Arm.

4.2. Mesure du débit

La mesure du débit a été effectuée par la « méthode d'exploration du champ de vitesse », avec un débitmètre à moulinet (annexe 8) et selon les prescriptions établies dans la norme européenne NF EN ISO 748 (AFNOR, 2002).

En 2002, des essais préliminaires avaient été réalisés en collaboration avec une équipe de l'Ifremer de Brest, qui utilisait cette technique de mesure du débit dans le cadre du programme « Apports à la mer côtière » (Piriou et Droit, 2001, Piriou, 2002 ; Piriou et Abernot-Le Gac, 2003). Ces tests ont confirmé l'intérêt de cette méthode pour évaluer les débits des étiers des bassins versants des traicts du Croisic et de Pen-Bé.

Les étiers suivis présentent des profils très différents, et cette technique a l'avantage de s'adapter rapidement à tout type de cours d'eau ; elle permet de pouvoir réaliser une mesure sur plusieurs verticales, même si le profil du cours d'eau est hétérogène. Elle permet aussi de réaliser un minimum de mesures et par conséquent de gagner du temps vis à vis de la marée montante.

En 2004, le protocole existant a été optimisé, pour permettre d'effectuer l'ensemble des prélèvements (7 étiers) pendant la même période de jusant. En effet, pour éviter la dilution par la marée montante, il faut réaliser l'ensemble des prélèvements entre BM et BM+4.

Suite à plusieurs séries de mesures réalisées sur l'étier de Pont d'Arm, l'optimisation du protocole s'est basée sur la caractérisation de l'écoulement.

Cette caractérisation permet ainsi de déterminer le secteur où est atteinte la vitesse moyenne sur la hauteur d'eau. Cette prise de vitesse unique permet ainsi de diviser par 3 le nombre de mesures rendues nécessaires par l'application du précédent protocole (on réalise à présent une mesure unique par section).

D'autre part la géométrie rectiligne d'un seuil en béton sous le Pont d'Arm nous permet de fixer un axe de symétrie de l'écoulement. Cette détermination permet également de diviser par 2 le nombre de mesures à effectuer, en effet la moitié des volumes écoulés passent par la moitié de la largeur du cours d'eau.

Pour l'étier de Pont d'Arm, après cette optimisation, le nombre de mesures est réduit de 21 à 3 avec une erreur minime de 6% sur le débit (annexe 9).

L'utilisation du débitmètre à moulinet a néanmoins ses limites, liées à un faible débit, et à une hauteur d'eau inférieure à 1,5 fois la hauteur de l'hélice. L'annexe 9 décrit et argumente le choix, dans certains cas, d'une méthode volumétrique alternative. Cette méthode consiste à récolter le liquide dans un sac plastique étalé sur toute la largeur du rejet et de mesurer ensuite le volume obtenu en fonction du temps de remplissage du sac.

On obtient donc un volume de liquide en fonction du temps, ce qui permet de déduire un débit. Une inter-comparaison a été effectuée permettant de valider cette méthode par rapport à la méthode du moulinet.

4.3. Paramètres retenus

Les paramètres suivis sur le terrain ont été sélectionnés suite à l'étude de Morin (2002) citée plus haut. En plus des paramètres classiques de qualité des eaux (température, salinité, pH, matières en suspension, oxygène dissous), nous avons retenu les nutriments (nitrate, phosphate), les bactéries *E. coli*, deux métaux (le cuivre et le zinc⁶, susceptibles d'être présents dans le milieu compte tenu des activités rencontrées sur les bassins versants) et

⁶ Du fait de diverses contraintes, les analyses de métaux n'ont pas encore été réalisées ; elles devraient l'être en 2005 ou 2006.

les produits phytosanitaires dont l'utilisation sur les bassins versants avait été confirmée par Morin (2002). La méthodologie des prélèvements et les protocoles analytiques sont détaillés par Buchet (2003), qui donne des prescriptions particulières en fonction des différents paramètres (type de flaconnage, volume à prélever, port éventuel de gants, étiquetage, stockage,...).

4.3.1. Paramètres généraux de qualité des eaux

En 2003, les mesures étaient effectuées par le laboratoire Pen-Avel de Cap Atlantique, qui suit, depuis une dizaine d'années, ces paramètres dans plusieurs points des traicts et des étiers. En 2004 elles ont été réalisées par le laboratoire DEL/MPL (LER/MPL) grâce à une sonde YSI multi-paramètres, dont les caractéristiques sont précisées dans l'annexe 10. Une intercomparaison a été réalisée en 2003 et 2004, aucun écart significatif n'a été observé.

La Température

La température est l'un des descripteurs de base pour la connaissance du milieu. Elle influe sur le cycle biologique et elle conditionne la saturation du milieu en oxygène dissous et également la dissociation gazeuse de l'azote ammoniacal (NH_4^+) en ammoniac toxique (NH_3). En 2002 et 2003, les mesures étaient effectuées par le laboratoire Pen-Avel de Cap Atlantique. En 2004 les mesures ont été réalisées par le laboratoire LER/MPL grâce à une sonde YSI multi-paramètres.

La Salinité

La salinité est un excellent traceur des mélanges de l'eau douce et de l'eau de mer. Dans cette étude, elle permet de pouvoir caractériser le rejet : une eau peu saline traduit des apports d'eau douce susceptibles de véhiculer des substances provenant du bassin versant.

La mesure de ce paramètre est réalisée grâce à une sonde composée d'électrodes de Clark (conductivité ramenée à la salinité) sur la sonde multi-paramètres en 2004 et auparavant sur une sonde HACH Sension 5 de CAP Atlantique.

Le pH

Le pH est l'indicateur d'un équilibre entre les espèces chimiques majeures du milieu. Il influe sur le comportement des polluants tels que la précipitation, l'adsorption et la dissociation des métaux et de l'azote ammoniacal.

Alors qu'en milieu marin le pH se situe autour de 8, il peut varier jusqu'à 7 en milieu estuarien du fait des rejets industriels ou urbains, ainsi que des apports de matière organique d'origine continentale.

Compte tenu de ces faibles variations, Aminot et Kerouel (2004) soulignent qu'il n'est pas utile de surveiller le pH en routine, sauf en cas de pollution avérée. Néanmoins, compte tenu du peu de données existant dans ces étiers, et de la facilité de mesure avec la sonde multi-paramètres, nous avons choisi d'enregistrer les valeurs de pH lors de chaque sortie.

La mesure du pH a été réalisée grâce à l'électrode pH de la sonde multi-paramètres en 2004 et un ph-mètre de terrain en 2003.

L'oxygène dissous

L'oxygène dissous est le paramètre essentiel pour le suivi de la qualité du milieu. Il intervient dans les processus biologiques permettant la vie marine.

Les eaux eutrophisées ou chargées en matière organique présentent des teneurs faibles en oxygène dissous. D'autre part, le processus de la nitrification de l'ammonium consomme de l'oxygène.

On distingue des niveaux critiques rapportés par Guillaud & Souchu (2001) *in* Aminot & Kerouel (2004)

- au delà de 5mg/l, il n'y a pas d'effets négatifs sur le biotope.
- entre 2mg/l et 5mg/l, on observe des zones d'évitement par la faune.
- en dessous de 2mg/l, il y a anoxie, qui peut se traduire par des mortalités massives.

Les mesures de l'oxygène sont obtenues par une électrode à membrane platine argent sur la sonde multi-paramètres et une sonde HACH Sension 6 de CAP Atlantique en 2003.

Les Matières en suspension (MES)

La concentration en un polluant est étroitement liée à la quantité de matières en suspension présente dans le milieu. La quantité de ces MES est très variable et dépend particulièrement des épisodes de pluviométrie importante (crues).

Une mesure en MES peut être révélatrice de pollution physique de l'eau et par conséquent être préjudiciable dans un secteur conchylicole. En effet, une eau chargée en MES peut véhiculer des germes fécaux ou des micropolluants adsorbés sur ces particules favorisant ainsi leur rémanence dans le milieu.

Pour cette étude, des prélèvements sont effectués dans le milieu à l'aide de flacons spécifiques (préalablement traités), puis analysés au laboratoire de Pen Avel (Cap Atlantique).

Les analyses sont effectuées selon une méthode d'analyse normalisée référencée, par l'AFNOR : NF T90-105 « Qualité de l'eau - Dosage des matières en suspension - Méthode par filtration ».

4.3.2. Nutriments

Les mesures des concentrations en nutriments permettent de mettre en évidence une éventuelle eutrophisation du milieu liée aux activités anthropiques présentes sur le bassin versant (rejet d'eaux usées et pratiques agricoles).

Les concentrations en nitrate et nitrite présentent des flux maxima en période de débit maximum : elles sont liées au phénomène de lessivage des sols.

Pour cette étude, des prélèvements sont effectués dans le milieu à l'aide de flacons spécifiques (préalablement traités), puis analysés au laboratoire de Pen-Avel (Cap Atlantique) selon les méthodes suivantes :

- pour l'ammonium, le dosage est réalisé selon la méthode de Nessler.
- pour le nitrate, le dosage est réalisé par la méthode de réduction au Cadmium.
- pour le phosphate, le dosage est réalisé par la méthode à l'acide ascorbique.

Certaines analyses ont été réalisées par l'Institut Départemental d'Analyses et de Contrôle (IDAC) de Nantes, selon les normes NF ISO 13395 (T90-012) « Qualité de l'eau - Détermination de l'azote nitreux et de l'azote nitrique et de la somme des deux par analyse en flux (CFA et FIA) et détection spectrométrique » et NF EN 1189 (T90-023) « Dosage du

phosphore »). Ces analyses ont été effectués en double au laboratoire de CAP Atlantique et a l'IDAC, la comparaison des résultats ne montre pas de différence significative.

4.3.3. Contamination bactériologique

Les pratiques agricoles, ainsi que les rejets domestiques (*a fortiori* lorsque les systèmes d'assainissement sont vétustes ou défectueux), sont à l'origine de contaminations fécales. La recherche de ce type de contamination s'effectue sur la bactérie témoin de contamination fécale *Escherichia coli*, dont la forte concentration peut indiquer la présence dans le milieu de bactéries pathogènes ou de virus. La recherche de ce germe est donc essentielle dans la détermination de l'impact sanitaire sur les secteurs conchylicoles.

En effet la quantification de *E. coli* intervient dans la classification des zones de production de coquillages, définissant ainsi le traitement à suivre pour leur commercialisation (section IV du Règlement (CE) N°853/2004 fixant les règles spécifiques d'hygiène applicables aux denrées alimentaires d'origine animale).

Dans cette étude, les prélèvements sont réalisés grâce à un flaconnage stérile spécifique fourni par le laboratoire chargé de l'analyse.

Les analyses sont effectuées par l'IDAC selon une méthode d'analyse normalisée, référencée par l'AFNOR : NF EN ISO 9308-3-T90-433 « Qualité de l'eau. Recherche et dénombrement des *Escherichia coli* et des bactéries coliformes dans les eaux de surface et résiduaires ». Partie 3 : méthode miniaturisée (nombre le plus probable) pour ensemencement en milieu liquide.

4.3.4. Métaux

Les principales sources potentielles de pollutions métalliques dans les étiers sont les eaux de ruissellement sur les surfaces urbanisées, l'agriculture et les peintures antisalissures des carènes de bateaux.

Or, au delà d'une certaine concentration, certains métaux dissous peuvent constituer de véritables poisons pour l'écosystème aquatique.

Les métaux-traces se rencontrent partout dans l'environnement et sont en particulier associés aux poussières atmosphériques.

Les métaux peuvent être à l'état particulaire et/ou dissous dans le milieu. Leurs comportements dépendent généralement des conditions hydrologiques, de leur disponibilité et de leur affinité avec les substances colloïdales et avec les organismes vivants présents dans le milieu.

Les prélèvements ont été réalisés en tenant compte des prescriptions définies par le laboratoire Biogéochimie de l'Ifremer (Chiffolleau *et al.*, 2002 ; Chiffolleau *et al.*, 2003 ; Cossa *et al.*, 2002).

Après prélèvement, les échantillons ont été filtrés et acidifiés, permettant de les conserver 2 à 3 ans pour une analyse ultérieure. Les métaux seront dosés à la fois dans l'eau mais aussi dans les matières en suspension.

Il seront par la suite analysés selon les protocoles établis par le laboratoire de Biogéochimie (Cossa *et al.*, 2002 ; Chiffolleau *et al.* ; 2002, 2003).

Du fait de diverses contraintes, les analyses de métaux n'ont pas encore été réalisées ; elles devraient l'être en 2006.

4.3.5. Phytosanitaires

Au même titre que les engrais, les pesticides sont surtout responsables de pollutions diffuses. Ils sont épandus ou pulvérisés sur les terres pour l'usage agricole, sur les bords de route par les collectivités, pour le désherbage des voies ferrées ou dans les jardins par les particuliers. Ces produits phytosanitaires contribuent à l'accroissement de productivité ou à la réduction des coûts de production de manière significative pour les producteurs mais présentent des dommages sanitaires et environnementaux pour la collectivité. Aux Etats-Unis, on estime qu'un dollar de dépense en pesticides permet de sauver 4 dollars de récoltes pour le producteur alors que ce chiffre tombe de 1 à 1,3 dollars en tenant compte des coûts externes de restauration du milieu (OCDE, 1997 *in* Chambard, 2004).

La contamination des eaux superficielles et souterraines a été citée comme un problème majeur de beaucoup de pays européens (EEA, 2003 *in* Chambard 2004). Ainsi, le dernier rapport de l'Institut Français de l'Environnement (Ifen), faisant état de la contamination des eaux continentales en France pour l'année 2002, confirme la présence préoccupante de produits phytosanitaires dans les eaux utilisées pour l'alimentation en eau potable (AEP) (59% des prises d'eau superficielle contrôlées et 55% des prises d'eau souterraine ; Ifen, 2004).

Enfin, les estuaires, et plus largement les zones littorales, véritables intégrateurs de la pollution des bassins versants, concentrant de nombreuses activités économiques et récréatives, ne sont pas épargnés comme tendent à le montrer de plus en plus d'études locales (Mazoyer, 1998 ; Tronczyński et Moisan, 1999 ; Tronczyński *et al.*, 1999 ; Auby et Maurer 2004 ; Munaron, 2004).

La surveillance des produits phytosanitaires en milieu marin côtier nécessite la mise en place de stratégies qui tiennent compte des spécificités de ce milieu, de la diversité des molécules dont les propriétés conditionnent leur comportement biogéochimique et leur effets écotoxicologiques, et également des pratiques agricoles (Munschy *et al.*, 2004).

Comme nous l'avons évoqué plus haut, la sécheresse du printemps et de l'été 2003 a empêché tout échantillonnage dans les étiers du Croisic avant le mois de novembre 2003. 7 campagnes d'échantillonnage ont eu lieu de novembre 2003 à novembre 2004.

Un volume de 4 litres était prélevé dans chaque étier, dans des flacons spécifiques en verre brun, fournis par le Centre de Génie Industriel (CGI) de Guidel (Morbihan), qui a réalisé les analyses. Les flacons étaient ensuite conservés dans une glacière, et acheminés à Guidel dans les 24 heures suivant le prélèvement.

Les molécules recherchées

L'état des lieux réalisé par Morin (2002) a permis de mettre en évidence les molécules les plus utilisées sur les bassins versants, essentiellement par la SNCF, la DDE et les collectivités locales. Cette étude devait être complétée par une enquête menée depuis 2002 dans les Pays de la Loire par la CREPEPP sur l'usage des phytosanitaires utilisés en agriculture .

Ces résultats n'étant toujours pas disponibles, le repérage préalable des pratiques culturales par parcelle sur ces bassins versants à l'aide de photographies aériennes (orthophotographies) et de sorties sur le terrain a permis de compléter cette approche. A partir de ces informations, une carte très précise d'occupation des sols sur les bassins versants a été réalisée pour le secteur étudié (Fig. 22 ; Lomakine, 2005) ; elle contribue également à l'identification des molécules utilisées. En parallèle, la base de données du ministère de l'agriculture qui recense les pratiques de traitement en fonction des cultures, a été consultée : (<http://e-phy.agriculture.gouv.fr/wiphy/>)

Par ailleurs, CAP Atlantique a réalisé sur son territoire des enquêtes portant sur les quantités de pesticides utilisées.

A l'issue de ces investigations, le nombre de molécules susceptibles d'être présentes dans le milieu était relativement élevé, et le laboratoire CGI nous a incités à opter pour une stratégie de recherche par famille de phytosanitaires (urées substituées, organoazotés, phénoxyacides,...), dont le tarif est finalement peu éloigné d'une stratégie par substance. On balaie ainsi un plus grand spectre de molécules phytosanitaires.

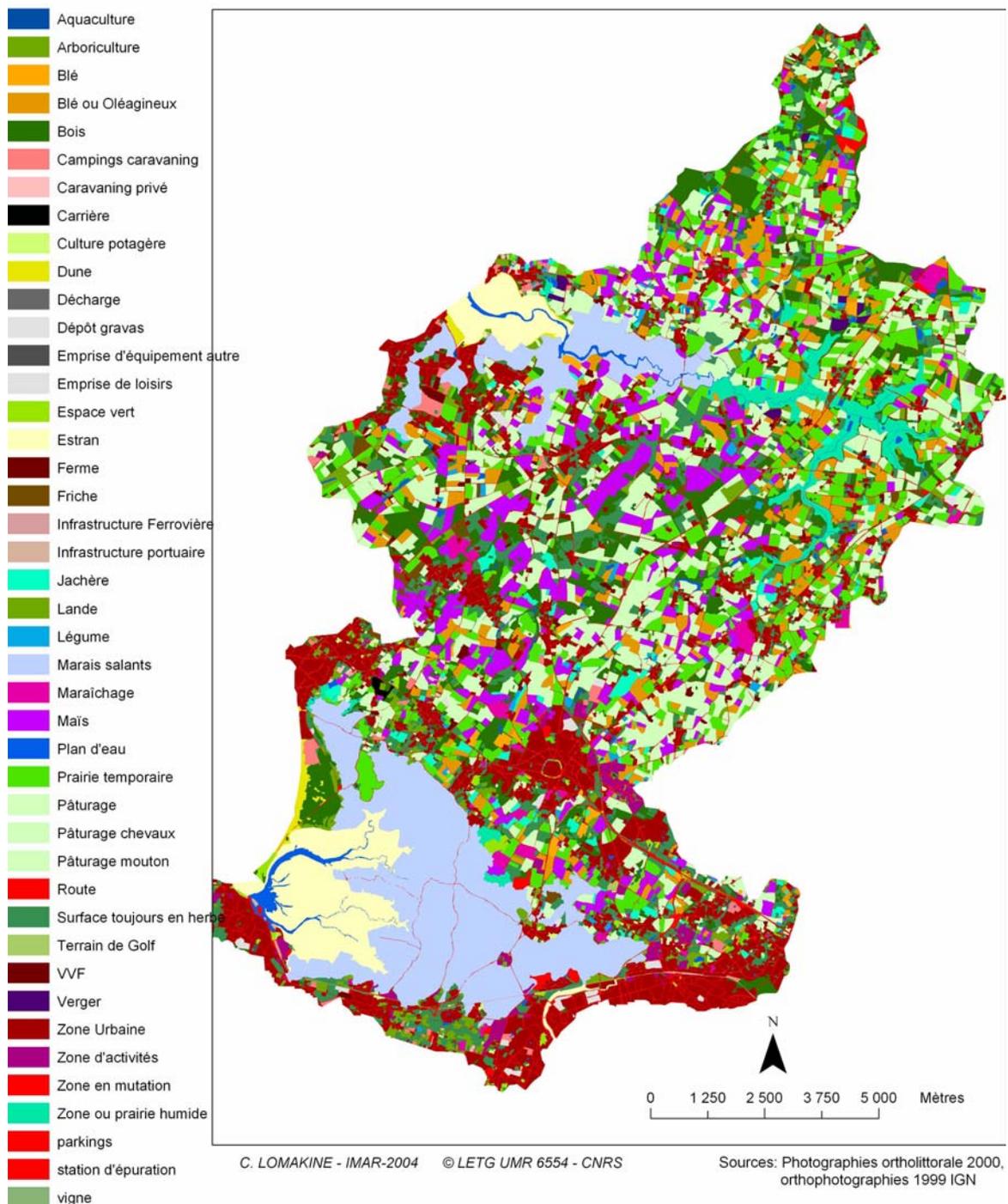


Figure 22. Occupation des sols des bassins versants guérandais et du Mès en 2000

La liste des molécules recherchées figure en annexe 11 et les seuils de quantification sont mentionnés. Avant l'analyse, tous les échantillons ont été filtrés par le laboratoire CGI sur une membrane de porosité 0,45 µm. Les triazines et urées sont analysées en chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse (HPLC/MS) selon la norme NF EN ISO 11369. La recherche des organochlorés et des organophosphorés est effectuée respectivement selon les normes NF EN ISO 6468 et NF EN ISO 12918 (chromatographie gazeuse et détection par spectrométrie de masse GC/MS). Les autres molécules, pour lesquelles il n'existe pas de norme, sont analysées par des méthodes internes, utilisant les techniques HPLC/MS et GC/MS.

Le laboratoire CGI est accrédité COFRAC pour les analyses des triazines-urées et des organochlorés.

5. Modélisation hydrodynamique

5.1. Pourquoi un modèle numérique ?

Sous l'action des vagues et des courants, une pollution en bordure littorale est transportée, diluée, dispersée pour finalement aboutir à une distribution spatiale difficilement prévisible sans un outil qui prenne en compte l'ensemble de la zone hydrodynamique et des paramètres en jeu. Les modèles numériques ont été rapidement développés à cet effet au cours des dernières années, grâce en particulier aux progrès de l'informatique, qui permettent la résolution des équations complexes de l'hydrodynamique. Ils permettent ainsi de mieux comprendre le comportement des masses d'eau et de prévoir le devenir des contaminants qu'elles contiennent (phénomènes de dilution et de dispersion), des larves de coquillages, et éventuellement des sédiments fins pour les modèles les plus sophistiqués.

L'objectif ici est de disposer d'un outil qui aide à expliquer finement les phénomènes locaux, en intégrant les données fournies par les réseaux de mesure existants et celles qui sont acquises au cours de ce programme (apports par les bassins versants, paramètres hydrologiques, phytosanitaires,...). Il faut signaler que les modèles hydrodynamiques sont de plus en plus fréquemment utilisés comme outil d'aide à la gestion et à la décision, aussi bien pour évaluer l'impact des rejets urbains en zones littorales, que pour hiérarchiser les sources de pollution connues (Le Bec et Le Mao, 2002 ; Le Goff et Riou, 2002 ; Camus et Dumas, 2003 ; Grangeré, 2004) et pouvoir ainsi agir le plus en amont possible.

La réalisation d'un modèle hydrodynamique passe par le découpage de la zone d'étude en « mailles », dont le nombre et la taille varient en fonction de l'étendue du secteur et de l'échelle de temps pertinente pour expliquer les phénomènes observés. Dans les traicts du Croisic et de Pen-Bé, les applications à caractère local (dilution des rejets, impact sur les secteurs conchylicoles) nécessitent la mise en œuvre de modèles à mailles fines, ce qui impose de disposer d'un relevé bathymétrique très précis.

En l'absence de telles données sur la zone d'étude, nous avons entrepris l'acquisition de données bathymétriques grâce à la technique du laser aéroporté (LIDAR).

5.2. Acquisition de données bathymétriques : la technique LIDAR

La technique LIDAR (Light Detection And Ranging = détection de la lumière et mesure à distance, proche du RADAR), présente de nombreux intérêts par rapport aux méthodes

classiques (photographies, sondages par bateau, relevés de terrain). Les mesures sont réalisées rapidement (40 km²/heure), elles sont denses (1 point tous les 2 mètres) et précises (30 cm en horizontal et 15 cm en vertical).

En revanche, cette technique ne peut s'utiliser qu'en l'absence de nuages entre 700 m et 1000 m d'altitude. D'autre part, en zone côtière, il faut travailler lors de grands coefficients de marée, pour avoir des surfaces d'estran maximales. C'est la raison pour laquelle l'opération de levé bathymétrique initialement prévue en mai 2002 a du être repoussée en août 2002, puis finalement fin septembre 2002. Populus (2002) dresse un bilan de cette technique, dont sont extraites les figures 23 et 24.

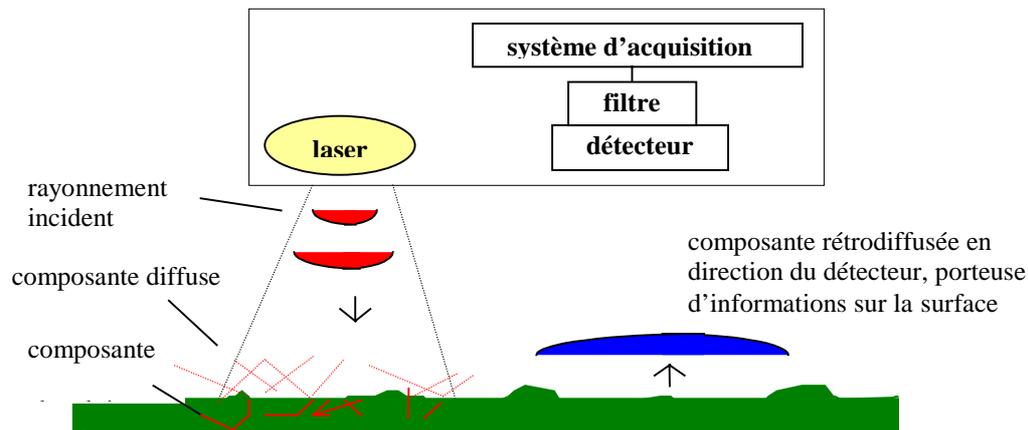


Figure 23. Schéma de principe du LIDAR (Populus, 2002)

Le plan de vol est adapté à la surface et à la géométrie du secteur.

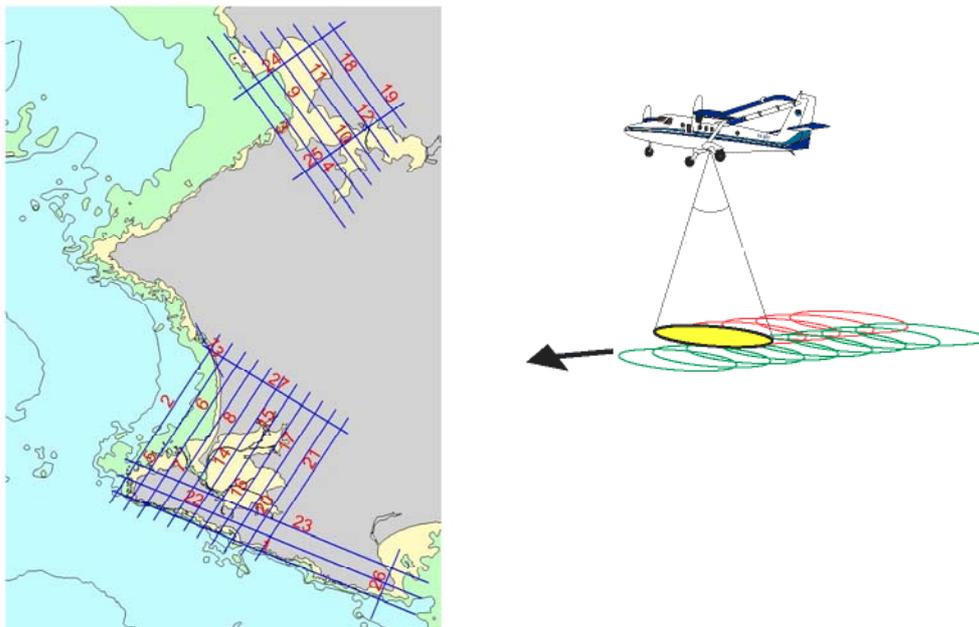


Figure 24. Plan de vol adopté au Croisic et à Pen-Bé (Populus, 2002)

Les résultats du LIDAR consistent en fichiers de données, assemblés par briques de 4 km² (2 millions de points par brique) ; ces fichiers ont été assemblés au Centre Ifremer de Brest pour obtenir une précision compatible avec les nécessités du modèle hydrodynamique.

Les données acquises peuvent ensuite être utilisées pour de multiples objectifs : suivi de l'évolution morphologique des estrans, cartographie, suivi de l'envasement (Mont Saint Michel, Vilaine, Pen-Bé), modélisation hydrodynamique, comme c'est le cas ici. La bathymétrie des deux secteurs est présentée au chapitre 1 (§3, Fig. 5).

5.3. Le code de calcul Mars 2D

Le modèle mis en oeuvre, MARS-2D, a été élaboré par l'Ifremer et est utilisé depuis plusieurs années dans les zones côtières et estuariennes (Salomon *et al.*, 1991, Camus et Dumas, 2003 ; Grangeré, 2004). C'est un modèle dit 2DH, c'est-à-dire à deux dimensions spatiales horizontales et à valeurs moyennées sur la verticale. Il est donc réducteur par rapport à la réalité qui, elle, est tridimensionnelle. Toutefois, compte tenu des secteurs étudiés, dont la profondeur est faible, on peut considérer qu'il n'y a pas de phénomène de stratification et que dans les traicts la masse d'eau est homogène sur la verticale, ce qui est confirmé par quelques campagnes de mesures (température, salinité, oxygène dissous, matières en suspension) réalisées par le laboratoire Pen-Avel de CAP Atlantique.

Cette simplification de la réalité (peu de variation des vitesses en fonction de la profondeur et vitesses verticales négligeables) permet de réduire considérablement les temps de calcul, et d'utiliser les modèles 2D à des échelles de temps comme le mois ou l'année, avec des mailles de petite taille.

Les éléments chimiques ou bactériologiques sont traités par une équation dite d'advection-diffusion, correspondant respectivement au transport et à la dispersion. Un terme de décroissance peut être ajouté pour prendre en compte la dégradation de certaines molécules ou la mortalité des bactéries, dont le comportement n'est pas conservatif. Dans le cas des germes tests *Escherichia coli*, par exemple, c'est la valeur du T90⁷ qui est prise en compte (annexe 12). La nature même du code de calcul (2DH) fait que ces éléments sont considérés comme étant totalement dissous dans l'eau : le transport des sédiments n'est pas reproduit.

Afin d'obtenir la précision requise sur le secteur étudié, les modèles MARS-2D du Croisic et de Pen-Bé sont imbriqués dans un modèle de grande emprise (le golfe de Gascogne) et de grande maille (11 km de côté, soit 121 km²). Grâce à un système de modèles gigognes, plusieurs modèles sont imbriqués en diminuant successivement l'emprise et la taille des mailles, chaque modèle fournissant au suivant les conditions aux limites (hauteurs d'eau et vitesses aux limites du domaine de calcul). On aboutit ainsi à un modèle très fin sur la zone d'étude.

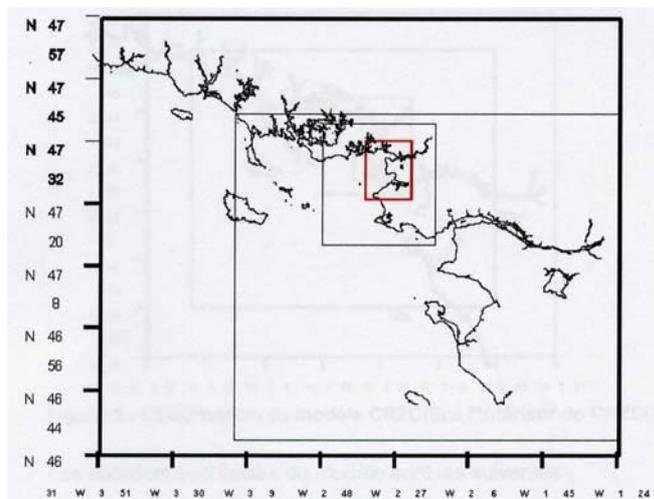
Les vitesses et hauteurs d'eau n'étant pas connues au début d'une simulation, l'ensemble du domaine est initialisé à un état de repos, plus précisément à hauteur constante égale à celle de pleine mer, et à vitesse nulle. Le modèle, à partir de cet état initial et des conditions aux limites, calcule les nouvelles valeurs de vitesses et hauteur d'eau dans chaque maille et pour chaque pas de temps. Un régime transitoire se met en place avant que le calcul ne converge vers les valeurs exploitables. On peut considérer qu'il est de l'ordre de deux à trois cycles complets de marée (1 cycle = basse mer + pleine mer). Il s'agit donc d'une contrainte peu pénalisante.

⁷ T90 : temps au bout duquel 90% des bactéries ont disparu

Le temps de calcul pour le modèle du Croisic est en effet de l'ordre de 1,5 h CPU (Central Processing Unit, unité de mesure de l'utilisation de l'ordinateur) pour 100 h réelles (hors calcul des conditions aux limites pour lesquelles il faut ajouter environ 50 à 60% de temps supplémentaire). Il est environ deux fois plus important pour Pen-Bé, le temps de calcul étant notamment proportionnel au nombre de mailles du domaine. Les calculs sont donc rapides et permettent des simulations sur plusieurs dizaines de jours.

5.4. Présentation des modèles utilisés

Le modèle réalisé sur Pen-Bé (cadre rouge, Fig. 25) s'étend ainsi de l'estuaire de la Vilaine à Piriac-sur-mer. Il est composé de 354 900 mailles carrées de 30 m de côté.



Ses limites sont les suivantes :

Nord : 47.55268°

Est : 02.372534°

Sud : 47.36178°

Ouest : 02.591772°

Figure 25. Emboîtement des modèles sur le secteur de Pen-Bé

Conçu selon la même technique, le modèle réalisé au Croisic (Fig. 26) s'étend de Piriac-sur-mer au sud de Batz-sur-mer (150 084 mailles de 30 m de côté), avec les limites suivantes :

Nord : 47.368°

Est : 02.4486°

Sud : 47.2658°

Ouest : 02.6062°

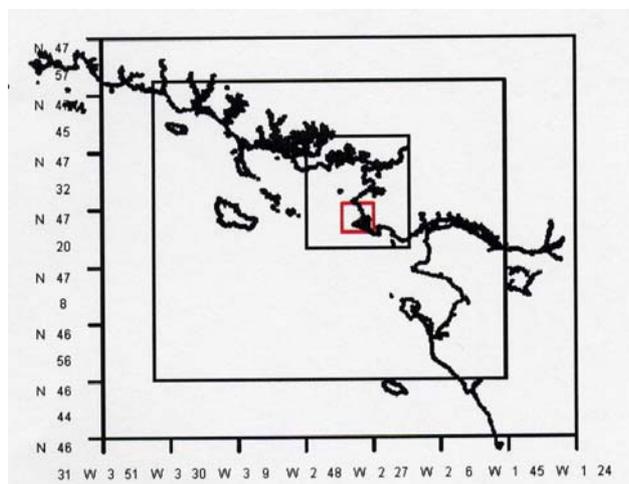


Figure 26. Emboîtement des modèles sur le secteur du Croisic

L'emprise de ce modèle est donc plus réduite que celui de Pen-Bé, dans lequel il a été décidé d'inclure l'estuaire de la Vilaine, qui joue certainement un rôle important dans la circulation côtière locale, et en tant que source d'apports polluants dans le traict.

Ce raffinement va permettre de comprendre les phénomènes à des échelles très locales, puisque chaque modèle va calculer la salinité, ou les concentrations des différents paramètres, tous les 30 mètres.

5.5. Calage des modèles

Avant d'utiliser les modèles pour simuler le devenir des substances dissoutes dans les traicts, il est indispensable de passer par une étape de calage, qui s'applique aux niveaux d'eau, aux courants et à la salinité. Elle consiste, selon le processus de la figure 27, à s'assurer d'un écart minimal entre la réalité et les résultats numériques en ajustant un certain nombre de paramètres qui varient d'un site à l'autre, et en particulier le coefficient de frottement qui dépend de la nature du fond.

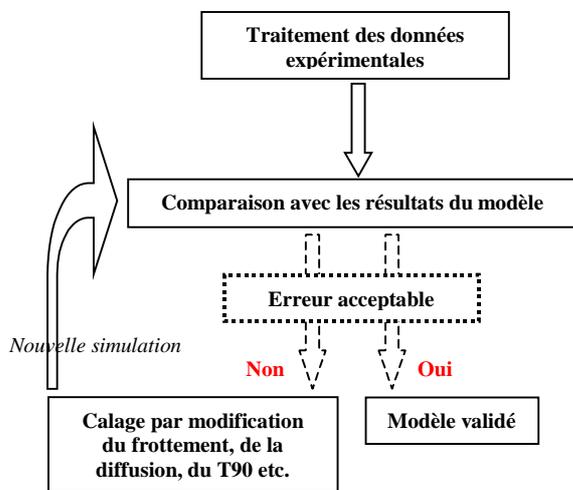


Figure 27. Processus de validation du modèle Mars 2D

Pour ce faire nous nous sommes appuyés, entre autres, sur des données existantes issues d'une campagne de mesures (hauteur d'eau, courantologie) réalisée au Croisic par la Sogreah (1997, 2002). Le suivi de la salinité dans les traicts par le laboratoire de CAP Atlantique nous donne également des indications, de même que les résultats REMI de l'Ifremer nous donnent la répartition globale des contaminations microbiologiques dans les sites étudiés.

Enfin, deux campagnes de mesures en mer ont été effectuées au large de Pen-Bé (annexe 13) et du Croisic (annexe 14), respectivement en juillet et septembre 2004 (mesures courantologiques au moyen d'un ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler – et de salinité), permettant de compléter le jeu de données disponibles (Annexe 15).

En revanche, les paramètres numériques du modèle tels que le pas de temps ou le schéma de résolution ne sont pas modifiables. Le pas de temps est adapté en continu de manière à optimiser le temps de calcul global.

Cette phase d'évaluation et d'optimisation de la capacité du modèle à reproduire et prédire les phénomènes de transport en zone littorale est détaillée en annexe 16.

6. Evaluation des stocks conchylicoles

6.1. Estimation des stocks d'huîtres dans le traict de Pen-Bé

La conchyliculture dans le traict de Pen-Bé/Mesquer est essentiellement partagée entre huîtres et moules. Les zones concédées à l'ostréiculture représentent environ 85 ha dont la moitié seulement est exploitée (Fig. 28).

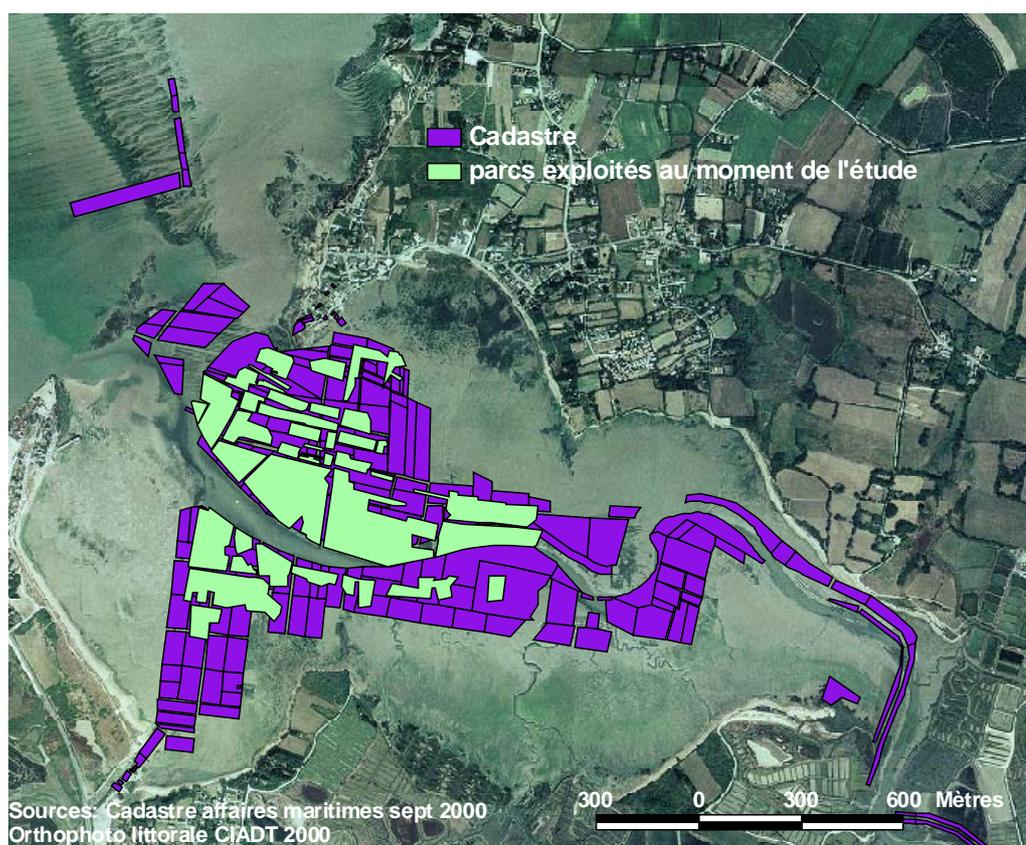


Figure 28. Cadastre conchylicole de Pen-Bé en septembre 2000 (violet) et surfaces occupées par des huîtres creuses au moment de l'étude (vert).

Depuis plus de 10 ans, la croissance et la mortalité des huîtres dans le traict de Pen-Bé sont suivies par le réseau REMORA de l'Ifremer. Ce bassin, qui présente de bonnes potentialités de croissance a vu cependant sa production diminuer par suite de mortalité des huîtres ainsi qu'une perte de qualité due à une infestation par le ver *Polydora*. L'envasement du traict est en partie responsable de cette baisse de production. Conscients du problème et suite à une étude réalisée sur l'ensemble des concessions (Syndicat des ostréiculteurs de Pen-Bé, 2002), les ostréiculteurs ont entrepris des travaux de nettoyage des concessions de manière à améliorer la circulation de l'eau et à limiter les phénomènes d'envasement. Il nous a donc paru nécessaire d'effectuer une première estimation du stock d'huîtres en élevage afin de disposer d'un point zéro en début de travaux de restructuration, qui permettra de suivre ultérieurement l'évolution de ce stock en relation avec les résultats de suivi de croissance, mortalité et qualité des huîtres du réseau Remora.

6.1.1. Méthodologie

Pour ce type d'estimation, la stratégie d'échantillonnage, mise au point à l'Ifremer (Bacher *et al.*, 1986) et déjà utilisée en baie de Bourgneuf (Baud & Hommebon, 1987 ; Baud & Haure, 1987 , 1989 ; Baud *et al.*, 1990), repose sur une stratification à deux niveaux : division des zones d'élevages en différentes strates homogènes et dans chaque strate, tirage aléatoire de points représentant des carrés de 1 ha qui seront échantillonnés pour obtenir un poids par m².

Par ailleurs, une couverture par photographie aérienne est réalisée pour estimer le taux réel d'occupation par les huîtres.

Le calcul du stock est réalisé par multiplication de la surface occupée par le tonnage au mètre carré.

6.1.2. Echantillonnage de terrain

Pour le traict de Pen-Bé qui est relativement homogène et dans lequel seuls 40 ha sont réellement exploités, nous avons décidé de ne considérer qu'une seule strate.

A partir du cadastre conchylicole et de l'orthophotoplan CIADT 2000, les zones exploitées ont été définies et cinq points, représentant cinq carrés de 1 ha, soit un peu plus de 10% de la surface exploitée, ont été tirés de manière aléatoire.

Pour chacun des points, l'échantillonnage terrain consiste à mesurer des longueurs de tables vides et occupées pour chaque classe d'âge (moins de 2 ans et plus de 2 ans) et type de support (poche ou collecteur). Des échantillons sont pesés pour obtenir un poids moyen par type d'élevage et par classe d'âge ainsi qu'une variabilité autour de cette moyenne. L'ensemble des données est archivé dans une base de données sous Access.

6.1.3. Traitement des photos aériennes

La technique de traitement et d'interprétation des photos aériennes a été développée par le Laboratoire Conchylicole de Poitou-Charentes à l'aide des logiciels Erdas-Imagin et Arcview (Le Moine *et al.*, 2002).

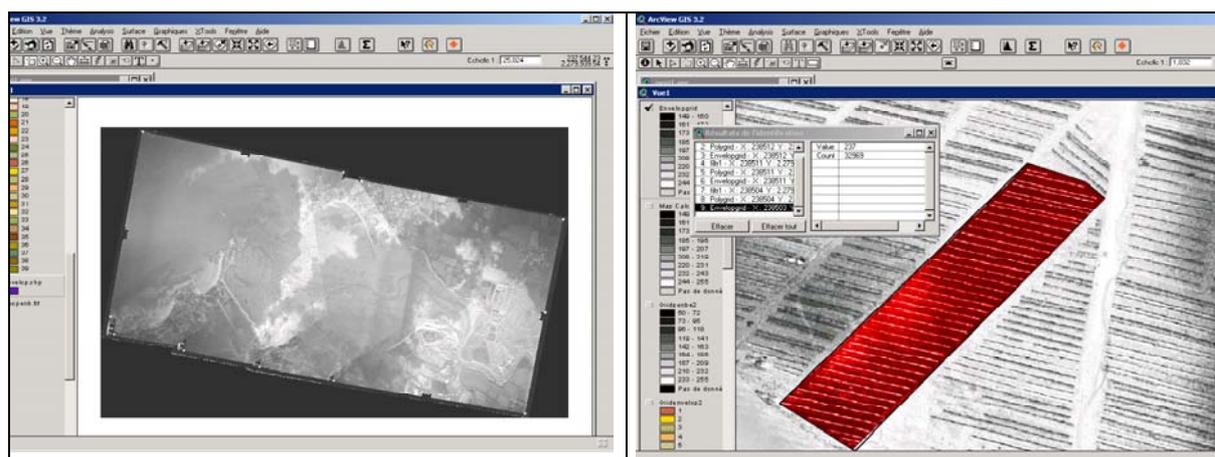


Figure 29. Mosaïque orthoréférencée et détermination des taux d'occupation

A partir des négatifs fournis par la société Sphair qui a réalisé la prise de photos en septembre 2002 par coefficient de marée supérieur à 95, plusieurs opérations sont nécessaires pour rectifier, géoréférencer et assembler en mosaïque les photos couvrant le traict de Pen-Bé (Fig. 29).

Le calcul est fait à partir de l'orthophotographie et se déroule en plusieurs phases, depuis la numérisation des emprises d'élevage jusqu'à l'obtention d'une table de résultats pour chaque parcelle (surface libre, surface en élevage, n° de strate,...).

L'objectif est ensuite de calculer le taux d'occupation réel des tables ostréicoles. L'analyse d'images permet de dénombrer les pixels correspondant à des tables chargées d'huîtres et à partir de là de calculer les taux d'occupation. Les mesures de longueur de tables sur le terrain permettent de calculer la surface occupée par type de support et par classe d'âge.

Le calcul du stock est réalisé par multiplication de la surface occupée par le tonnage au mètre carré.

6.2. Estimation des stocks de moules dans le traict de Pen-Bé

Depuis 5 à 10 ans, la mytiliculture regagne du terrain, notamment à l'entrée du traict où un certain nombre de demandes de changement de concessions a été enregistré par la Commission des Cultures Marines (transformation des concessions ostréicoles en concessions mytilicoles) ; les lignes de pieux occupent dorénavant une surface de 4 ha.

Les conchyliculteurs ont souhaité avoir également une meilleure connaissance des stocks de moules en élevage dans cette zone.

La méthodologie repose sur des paramètres mesurés sur le terrain dont les moyennes ont été affectées à des surfaces et des longueurs cultivées exhaustives, relevées sur photographies aériennes (Lefrançois, 1988).

Le travail sur le terrain a permis de diviser les 4 ha, au moyen d'un GPS, en surfaces de bouchots (polygones) constituant des parcelles homogènes (tailles des pieux, espacement entre bouchots etc.). Sur le terrain, 7 polygones ont été définis, mais le polygone 3 étant entièrement inoccupé n'a pas été pris en compte dans l'étude (Fig.30).

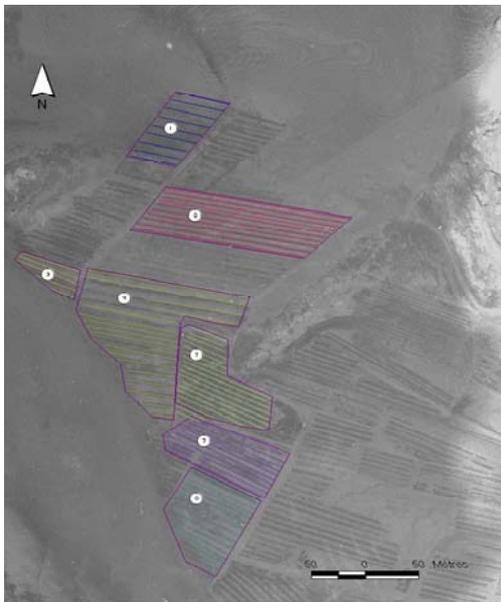


Figure 30. Localisation des bouchots à moules de Pen-Bé et polygones d'échantillonnage

Sur chacun de ces polygones, trois échantillonnages aléatoires ont été appliqués définissant ainsi un échantillonnage à trois degrés :

- tirage d'au moins trois bouchots pour dénombrer le nombre de pieux total, vide et garni de moules,
- tirage d'au moins deux pieux, parmi ces même bouchots, pour définir les paramètres de hauteur de moules garnissant les pieux,
- tirage d'au moins deux sections totales (moules + pieu) sur les pieux choisis auparavant (Fig. 31).



Figure 31. Mesure de la section totale d'un pieu

La section moyenne d'un pieu vide et la densité des moules (pesées d'un volume connu de moules) ont été estimées indépendamment, chacune par un échantillonnage aléatoire simple.

6.3. Estimation des stocks de coques dans le traict du Croisic

La surface concédée pour la conchyliculture représente 180 ha, soit 28% de la surface totale du traict. L'activité conchylicole du traict du Croisic comprend plusieurs types d'élevages : huîtres creuses (*Crassostrea gigas*), moules (*Mytilus edulis*), palourdes (*Venerupis spp.*), et coques (*Cerastoderma edule*). Ces dernières représentent la principale activité du traict avec environ 140 hectares de concessions soit 76 % de la surface allouée aux conchyliculteurs (Fig. 32). La production de coques est de 1200 à 2000 tonnes par an, ce qui fait du traict le premier centre d'élevage et le deuxième producteur français après la baie de Somme où 2500 tonnes par an sont extraites de l'exploitation des gisements naturels (Bonnell, 1986).

Il existe peu d'études scientifiques sur l'élevage de la coque dans le traict du Croisic. Les techniques d'élevage utilisées ont été toutefois abordées (Bonnell, 1986), et un état des pathologies liées à cette espèce a pu être dressé (Thébault, 2001). Des travaux, issus d'actions ponctuelles, ont été réalisés pour apprécier l'état général du cheptel de coques après les fortes mortalités de 1997 (Fleury *et al.*, 1999), ainsi qu'une étude sur l'optimisation du captage naturel local (Glize et Ponthoreau, 1997).

Cependant, au regard de l'activité conchylicole du traict du Croisic il a semblé indispensable d'engager des études permettant d'appréhender l'état des stocks de coques, son évolution dans le temps au cours d'un cycle de production et la dynamique de la croissance, de la survie et du recrutement naturel, comme cela a déjà été réalisé dans d'autres bassins de production français tels que Marennes Oléron (Héral *et al.*, 1988), Arcachon (Maurer, 1989) ou la baie de Bourgneuf (Haure et Baud, 1995). Les informations recueillies devraient, à terme, constituer une base de réflexions à l'usage des professionnels pour la bonne gestion de leur site de production.

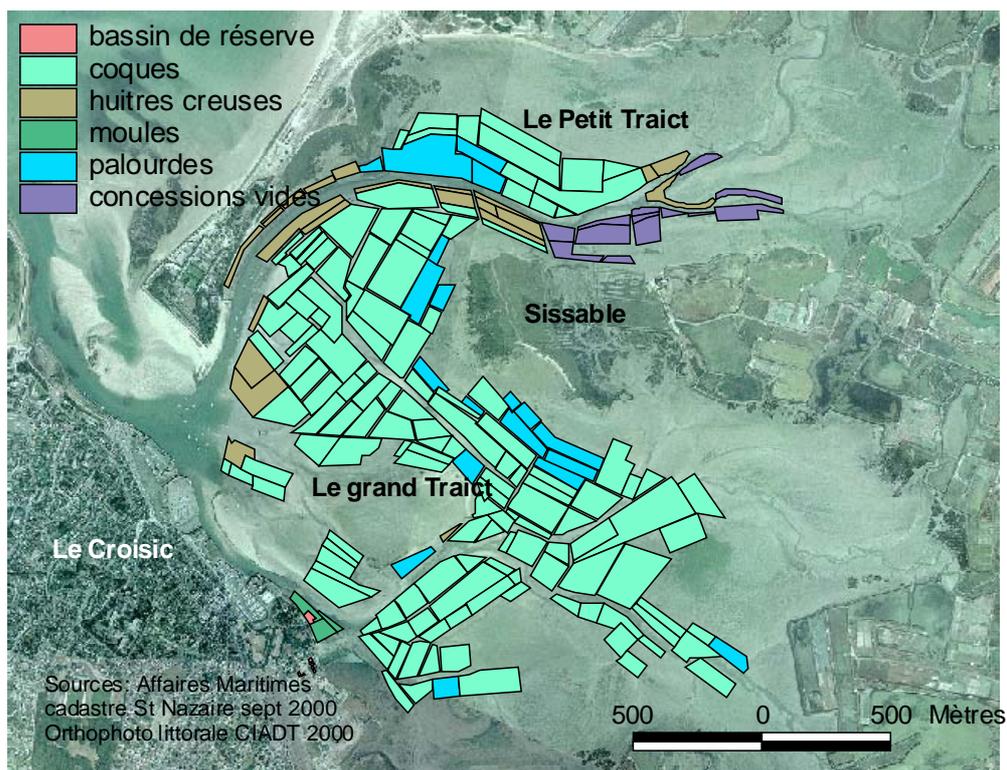


Figure 32. Répartition des concessions dans les traicts du Croisic en septembre 2000.

L'étude s'est déroulée en 3 phases : mise au point d'une stratégie d'échantillonnage, évolution de la biomasse au cours de l'année, et suivi de la dynamique de production en trois points des traicts.

6.3.1. Mise au point d'une stratégie d'échantillonnage

Il existe différentes stratégies pour estimer les stocks de bivalves cultivés ou présents sur des gisements naturels. Ces méthodes peuvent être adaptées selon les techniques culturales employées ou le mode de vie de l'animal.

Les coques étant des organismes fouisseurs, et la délimitation des parcs n'étant pas matérialisée sur le terrain, nous avons choisi d'appliquer une technique similaire à celle pratiquée lors d'études de stocks naturels de bivalves fouisseurs décrites par différents auteurs : Wilson (1982) ; Gros et Hamon (1989) ; Sauriau (1992) ; Bertignac *et al.* (2001).

Lors de ces études, tous les coquillages présents à l'intérieur d'un cadrat ont été récoltés, et ce sur quelques centimètres de profondeur.

Le plan d'échantillonnage variait par contre d'une étude à l'autre : échantillonnage systématique en baie de Dublin (Wilson, 1982) et en baie de Saint-Brieuc (Gros et Hamon, 1989), ou échantillonnage aléatoire dans les bassins de Marennes Oléron (Sauriau, 1992) et d'Arcachon (Bertignac *et al.*, 2001). Dans cette étude, nous avons opté pour un échantillonnage aléatoire stratifié.

Afin de mettre au point cette stratégie nous avons d'abord réalisé un pré-échantillonnage pour identifier des strates homogènes puis optimiser le plan d'échantillonnage par le choix

de la taille du cadrat et la détermination de l'effort en fonction de la précision souhaitée. Cette méthodologie a été décrite dans le rapport pour le Conseil Régional des Pays de la Loire (Haure *et al.*, 2002) et seuls les principaux résultats obtenus sont présentés ici.

6.3.2. Stratification

Quatre strates ont été identifiées en fonction de la nature du sédiment et de la pratique culturale (tab. 4 et Fig. 33).

tableau 4. Caractéristiques des différentes strates

Strate	Sédiment	Culture	Superficie (ha)	Nombre de concessions	Surface moyenne par concession (ha)
A	Sable	Semée	38,7954	41	0,9462
B	Sable	Non-semée	7,6189	14	0,5442
C	Sablo-vaseux	Semée	38,5068	36	1,070
D	Sablo-vaseux	Non-semée	51,8459	49	1,058
Total			136,767	140	0,9769

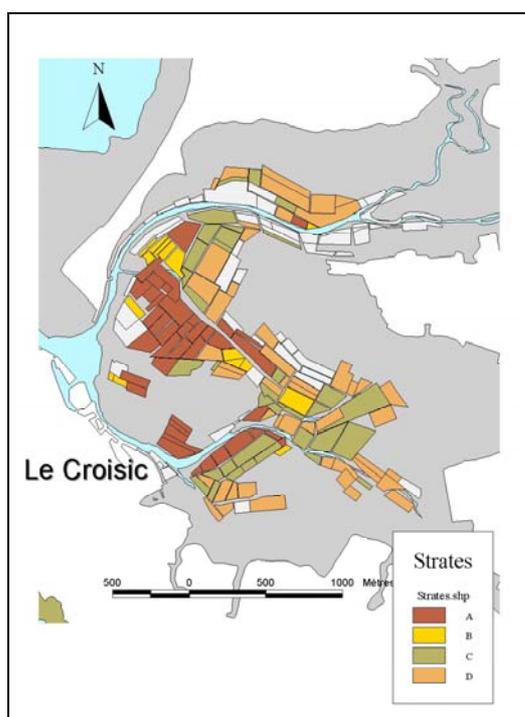


Figure 33. Répartition des 4 strates dans le tract du Croisic

6.3.3. Taille du cadrat et effort d'échantillonnage

Deux types de cadrats ($1/10$ et $1/16$ m²) ont été essayés. Les résultats ont montré que la précision était meilleure avec le cadrat de $1/10$ m², mais sans différence significative. Compte tenu de l'effort supplémentaire à fournir avec un cadrat de $1/10$ m² vis à vis de $1/16$ m², le choix s'est porté sur celui de $1/16$ m².

L'optimisation du nombre de cadrats par concession a été réalisée de manière à espérer une précision de 15 %. Les résultats du pré-échantillonnage ont permis de fixer à 15 le nombre de cadrats par concession pour obtenir cette précision.

Le nombre total de concessions à échantillonner a été déterminé par la courbe de l'allocation optimale qui a été tracée avec les données du pré-échantillonnage. Ce nombre est défini en fonction de l'effort que l'on peut fournir et de la précision que l'on veut atteindre. Pour ces raisons, un coefficient de 7,6 % a été jugé acceptable, et l'allocation optimale a fourni un nombre de 31 concessions à échantillonner sur la surface totale dédiée à l'élevage de la coque sur le traict du Croisic. Cet effort représentait 22 % de la totalité des concessions à échantillonner.

Enfin, pour une précision espérée de l'ordre de 15%, la répartition de l'effort d'échantillonnage au sein de chaque strate s'établit ainsi (Fig. 34) :

- a. strate A, 5 concessions, soit 12,2% des concessions de A
- b. strate B, 2 concessions, soit 14,3% des concessions de B
- c. strate C, 4 concessions, soit 11,1% des concessions de C
- d. strate D, 20 concessions, soit 40,8% des concessions de D.

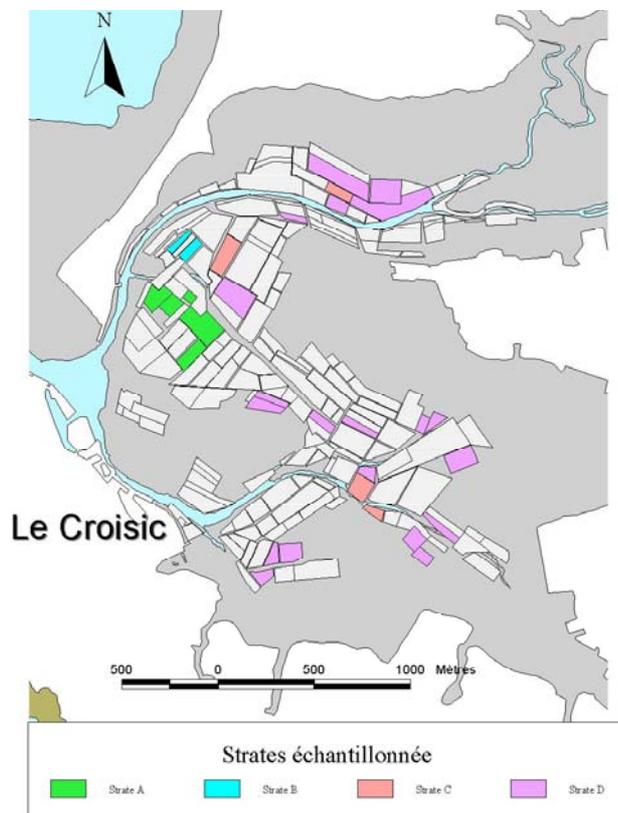


Figure 34. Localisation des concessions à échantillonner.

La méthode mise au point a été utilisée pour évaluer le stock de coques en élevage dans le traict du Croisic à 3 périodes de l'année : juin 2001, septembre 2001 et janvier 2002.

Pour chaque période d'échantillonnage, un tirage aléatoire des concessions par strate a été réalisé puis les 15 points de prélèvement par concession ont été tirés de manière aléatoire par l'outil de randomisation du logiciel Arcview, ce qui a permis d'obtenir les coordonnées géographiques de chacun des points. Ainsi, 465 prélèvements ont été effectués.

Après tamisage sur une maille de 4 mm, la totalité des coques récupérées sur la surface d'un

cadrat (Fig. 35) a été mise en poche et identifiée par le numéro du point de prélèvement pour faciliter, ultérieurement, le tri, le dénombrement et la biométrie des coques vivantes. Les points de prélèvements nuls ont été également identifiés afin d'en tenir compte lors de l'analyse des résultats.



Figure 35. Echantillonnage sur le site, prélèvement par cadrat et tamisage.

6.3.4. Suivi dynamique de la croissance, de la mortalité et du recrutement naturel

Les résultats obtenus au cours de l'étude sur l'évolution des stocks en élevage de juin 2001 à janvier 2002 nous ont amenés à entreprendre une deuxième étude visant à comprendre, au cours d'un cycle de production, les parts respectives de la mortalité, de la croissance et du recrutement naturel dans l'évolution des stocks.

Pour répondre à cela, une étude a été réalisée de mars à novembre 2003. Deux parcelles juxtaposées de 100 m² chacune ont été choisies au milieu du traict et ont été pêchées et nettoyées de toutes coques résiduelles. Suite à cela, une des deux parcelles a étéensemencée en naissain de coques alors que l'autre a été laissée en l'état pour l'évaluation du recrutement local (Fig.36).

Des échantillonnages bimensuels à l'aide d'un cadrat de 1/16 m² ont permis de suivre l'évolution des populations de coques dans chaque parcelle en biomasse, densité et répartition par classe de taille.



Figure 36. Localisation des parcelles de 100 m².

Chapitre 3 - Résultats

1. Estimation des apports par les bassins versants

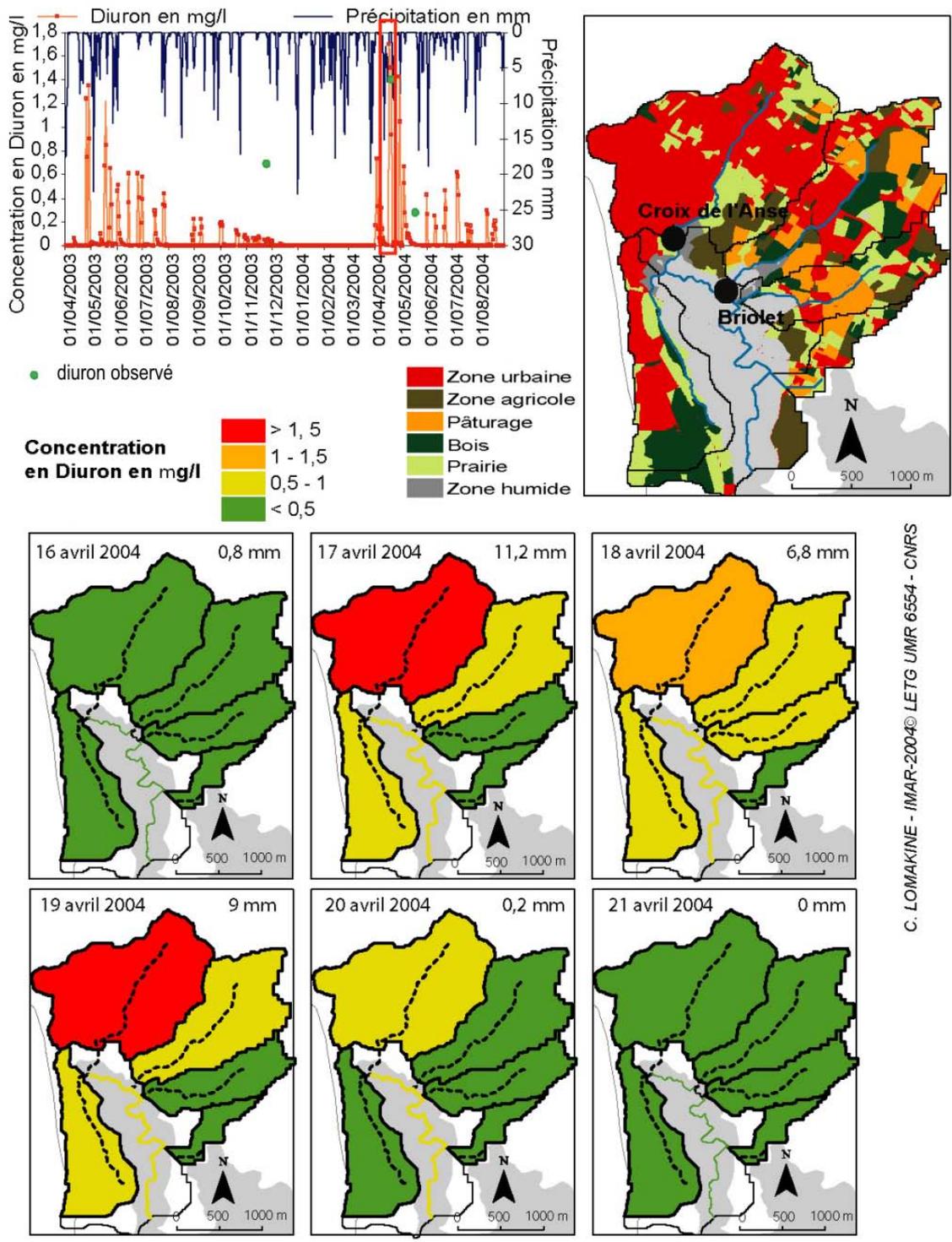
La modélisation des débits et de diverses substances transitant par les bassins versants a permis de réaliser des simulations journalières, qui ont été validées avec les mesures de terrain (annexe 21), puis des simulations à l'échelle d'une année.

Les résultats sont restitués grâce à une cartographie chronologique, qui représente la variabilité de la dynamique des différents bassins élémentaires, et qui permet de distinguer ceux qui présentent le plus de risques.

La figure 37 présente les concentrations de diuron, herbicide utilisé à la fois en milieu agricole et en milieu urbain, sur le bassin versant des traicts du Croisic (la norme d'application du diuron ne doit pas dépasser 1,5 kg/ha en milieu agricole). Sur le terrain d'étude, on ne connaît pas précisément les quantités de diuron utilisées, mais on a fait l'hypothèse que les apports en diuron étaient d'origine agricole et urbaine. Les apports simulés en milieu urbain sont de 0,01 kg/ha tandis que sur les cultures de maïs ils atteignent 0,1 kg/ha. La configuration de ces paramètres a permis de constater que les valeurs simulées du 20 avril 2004 en bassin versant non agricole sont équivalentes aux valeurs observées (observé : 1,4 µg/L ; simulé : 1,7 µg/L, voir pic encadré sur le graphique en haut à gauche figure 37 : le point vert correspond au diuron observé, le point rouge au-dessus correspond au diuron simulé).

La figure 37 permet ainsi de visualiser le comportement de l'herbicide à travers le réseau hydrologique, et de constater qu'une application unique début avril explique le pic observé du 20 avril 2004 lors d'un épisode pluvieux. Les concentrations de diuron mesurées aux exutoires des bassins versants non agricoles des traicts du Croisic confirment que cette molécule est largement employée. Le point de mesure de concentration semble donc stratégiquement bien placé (Croix de l'Anse), même si la simulation prévoit que le maximum se situe 2 jours auparavant, lors du maximum pluviométrique. Il faudrait donc envisager par la suite un calage plus fin du modèle (inadéquation pour certaines observations par rapport aux simulations « aveugles »).

L'épisode de simulation est compris autour de la date de prélèvement du 20 avril 2004. Au départ de l'épisode pluvieux (16 avril), avec une précipitation faible (0,8 mm), on remarque que les concentrations restent inférieures à 0,5 µg/l. L'arrivée brutale de précipitations (11,2 mm) le 17 avril provoque un transfert important du diuron qui se retrouve dans le cours d'eau à des quantités immédiatement plus élevées. Ainsi le cours d'eau du bassin versant de la Croix de L'Anse enregistre une valeur de 1,7 µg/l de diuron tandis que les autres bassins versants, beaucoup moins urbanisés, connaissent des concentrations en diuron inférieures à 1 µg/l. Ensuite, une diminution de la pluviométrie provoque une baisse de la concentration de la molécule dans le cours d'eau. La reprise des précipitations (9 mm) le 19 avril provoque de nouveau une augmentation sensible des concentrations en diuron notamment sur le bassin versant de la Croix de l'Anse. Lorsque l'épisode pluvieux s'arrête, les concentrations en diuron diminuent et les risques d'apports diminuent également. Lors des prochains épisodes pluvieux, les concentrations seront plus faibles voire nulles.



C. LOMAKINE - IMAR-2004© LETG UMR 6554 - CNRS

Figure 37. Simulation journalière du diuron sur le bassin versant de Lanclcy (traicts du Croisic) lors d'un épisode pluvieux du 16 au 21 avril 2004 (localisation de cette carte : voir carte de localisation générale hors-texte *in fine*)

Les produits phytosanitaires enregistrés à l'exutoire du bassin versant de la Croix de l'Anse correspondent à un usage urbain.

La même simulation annuelle du diuron a été effectuée sur le bassin versant de Pen-Bé pour distinguer les sous-bassins versants les plus polluants ; elle montre des flux comparables à ceux observés lors des campagnes sur le terrain, et met en évidence l'existence d'un sous-bassin versant plus polluant : le Belou. On observe que les concentrations en diuron sur le

bassin versant de Pen-Bé sont moins élevées du fait de la part moins importante des espaces urbains.

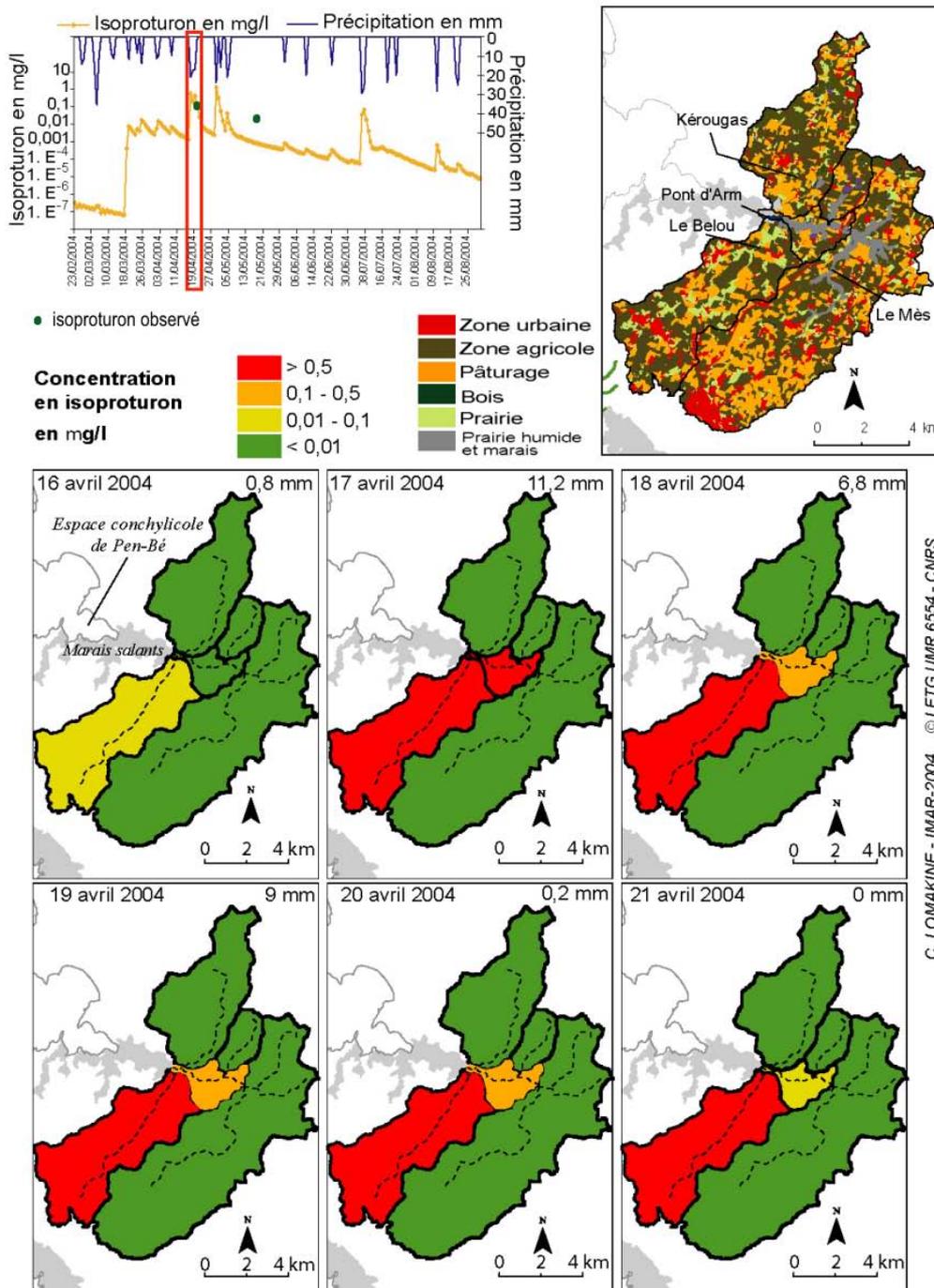


Figure 38. Simulation journalière d'isoproturon sur le bassin versant de Pont-D'Arm (Traict de Pen-Bé) lors d'un épisode pluvieux du 16 au 21 avril (localisation de cette carte : voir carte de localisation générale hors-texte *in fine*)

Une autre simulation, réalisée avec l'isoproturon⁸ (herbicide employé uniquement en agriculture sur les cultures de céréales) sur le bassin versant de Pen-Bé (application de 1 kg/ha le 1^{er} avril 2004 sur blé et maïs), confirme le caractère potentiellement polluant du sous-bassin versant du Belou (Fig. 38).

On remarque également que le cours d'eau central correspondant à l'étier de Pont-d'Arm accumule les arrivées hydrologiques contaminées en herbicide de tout un système de bassins versants (Belou, Kérougas, Mès...). Les concentrations dans cet étier sont inférieures à celles du bassin versant le plus polluant (le Belou) ce qui permet de supposer que les forts débits présents dans ce cours d'eau contribuent à diminuer la concentration d'isoproturon. Les prochains programmes de suivi pour mesurer les flux de polluants pour mettre en évidence les arrivées agricoles devront donc être effectués à l'exutoire de ce bassin versant pour vérifier l'exactitude du modèle.

La modélisation journalière des flux d'herbicides a permis de montrer que ces éléments étaient très sensibles à la pluviométrie et que les plus fortes concentrations se localisent dès les premiers épisodes pluvieux après une application du produit. Les mesures de suivi des étiers ont été effectuées à la bonne période et montrent que les bassins versants du Croisic sont fortement contaminés par les produits phytosanitaires d'origine urbaine. Les mesures réalisées au cours de cette étude (annexe 19) montrent que le bassin versant de Pen-Bé est modérément contaminé par les produits phytosanitaires utilisés en agriculture. Cet aspect est confirmé par les simulations réalisées avec SWAT et s'explique probablement par les caractéristiques paysagères de ce bassin versant qui abrite une importante zone humide.

A l'échelle de l'année, la simulation des flux totaux de diuron permet de voir sur l'ensemble du terrain d'étude les bassins versants affectés par les apports en herbicides issus en majorité des pratiques urbaines. On remarque que le diuron est présent sur tous les bassins versants, avec des flux variables d'un bassin versant à l'autre, le bassin versant de la Croix de L'Anse étant l'un des plus polluants.

Le terrain d'étude étant de dimension relativement modeste, la modélisation des nutriments a été testée sur l'ensemble des bassins versants élémentaires, ce qui permet de repérer les secteurs les plus sensibles.

La simulation des nitrates au cours de l'année 2001 permet de voir l'évolution mensuelle des flux de ces nutriments (fig. 39). D'une manière générale, les flux en nitrates les plus importants apparaissent durant la saison hivernale et au début du printemps. Les flux de nitrates observés en mars et avril, s'expliquent par la pluviométrie importante et les pratiques agricoles. C'est en effet durant cette période qu'ont lieu les principaux apports d'enrichissement des terres cultivées. En mai et juin, ces apports sont limités du fait d'une pluviométrie faible, de l'absence de pratiques d'enrichissement en azote et de la consommation par les plantes. On notera qu'un épisode pluvieux en juillet alimente à nouveau les cours d'eau en nitrates ; les flux les plus importants réapparaissent à partir d'octobre.

⁸ Ce produit n'étant pas référencé dans la base interne de SWAT, il a été nécessaire d'éditer ses caractéristiques. Certaines informations n'étant pas disponibles, seuls le coefficient d'absorption dans le sol, le temps de dégradation du produit et la solubilité dans l'eau ont été introduits dans le modèle avec leurs valeurs réelles. Le temps de résistance sur le feuillage et la fraction d'application ont été choisis de manière arbitraire.

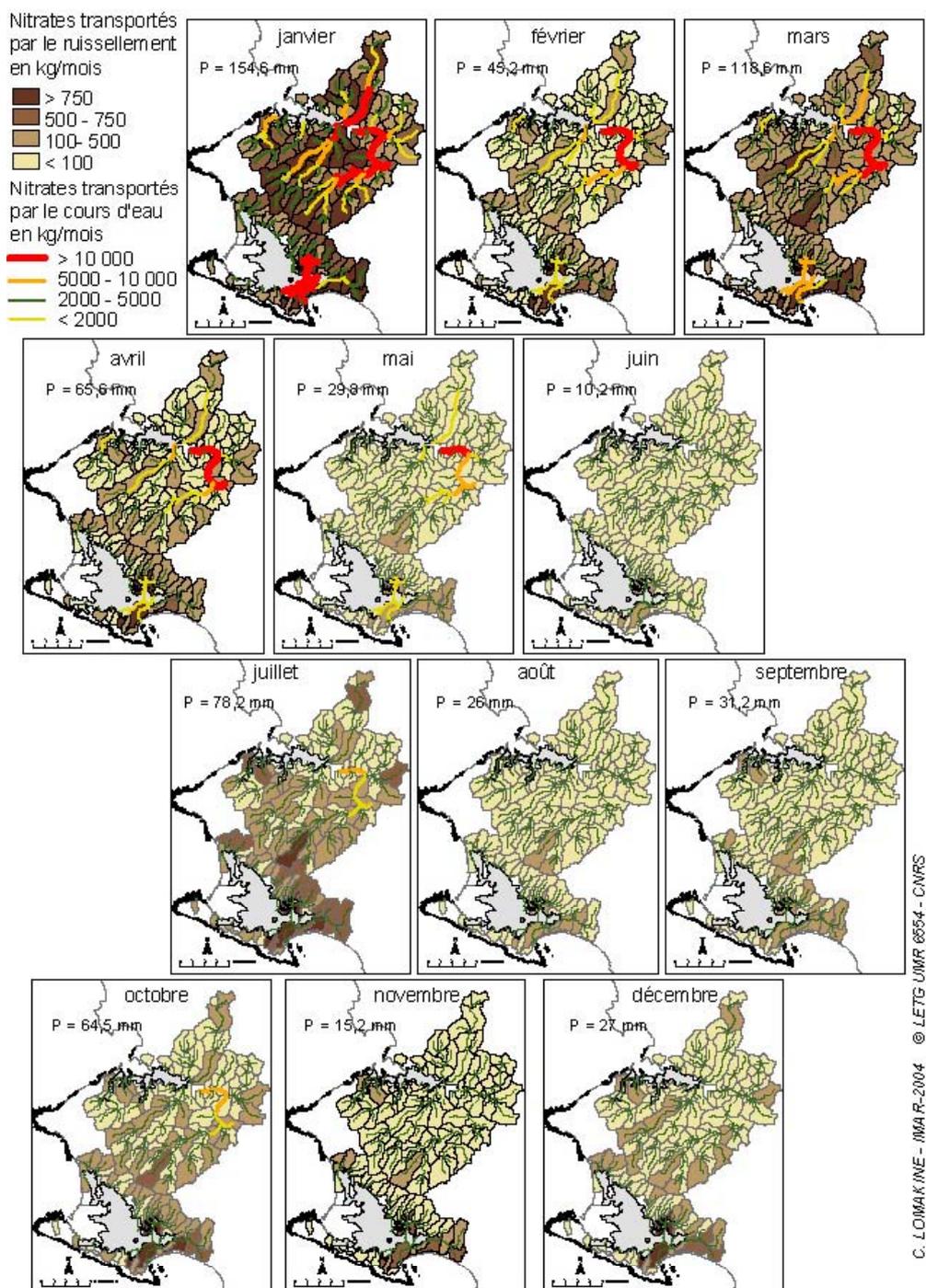


Figure 39. Simulation mensuelle des flux de nitrates en 2001

La simulation des flux de phosphates a également été réalisée (Fig. 40); leur dynamique au cours de l'année est semblable à celle des nitrates. En revanche, la pollution des eaux par les phosphates remonte davantage en amont des systèmes hydrologiques. Les flux importants de phosphates apparaissent sur de plus longues sections de cours d'eau. Ces résultats montrent que la pollution des rivières par les phosphates est plus importante que celle par les nitrates. On notera que le cours d'eau du Mès (à l'est du bassin versant de Pen-Bé) apparaît continuellement comme celui possédant les flux les plus élevés quelle que soit la saison. Par ailleurs, les pics de phosphates sont davantage liés à des épisodes pluvieux,

ce qui peut traduire une remise en suspension lors du ruissellement des phosphates piégés dans les sédiments.

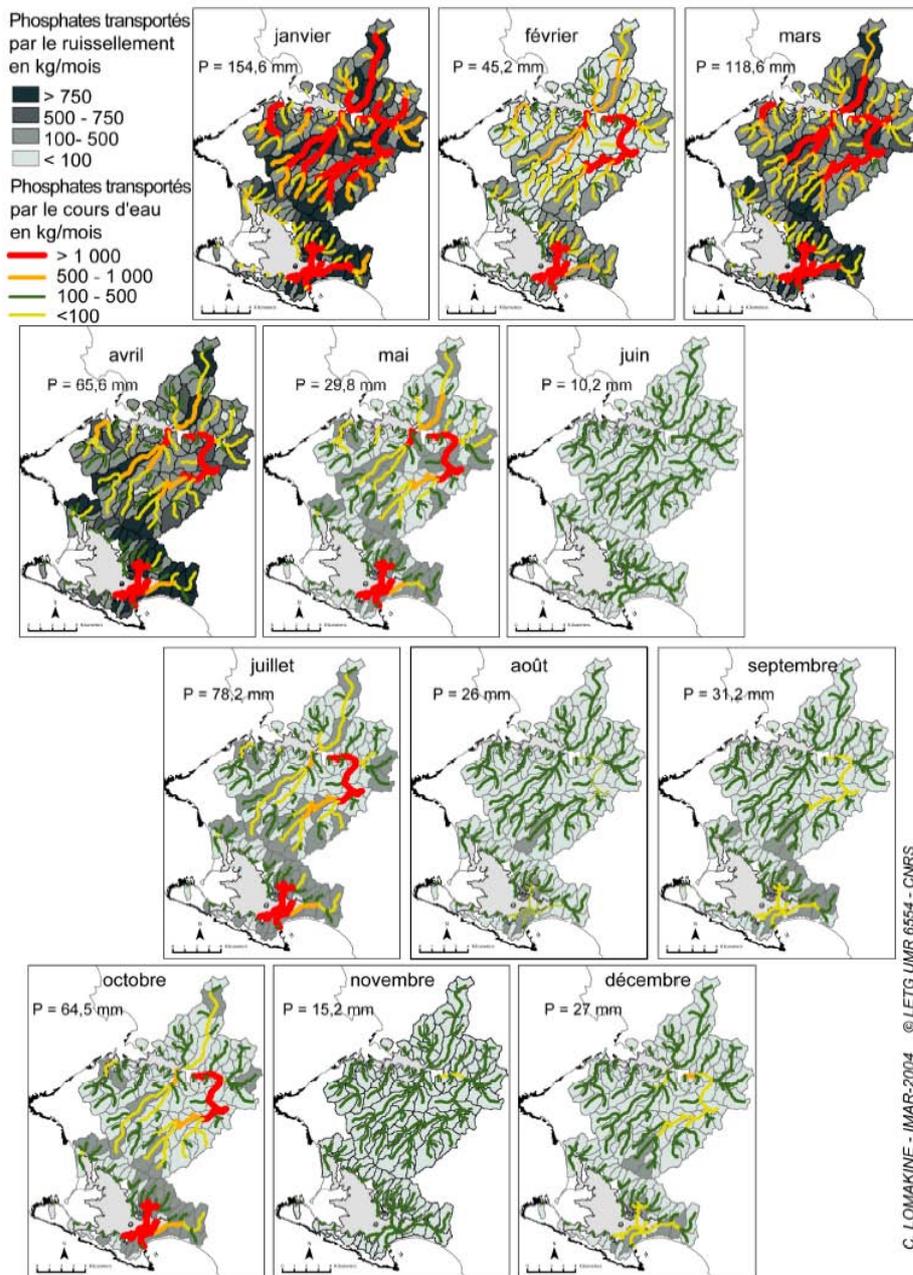


Figure 40. Simulation mensuelle des flux de phosphates en 2001

Une simulation des concentrations de coliformes fécaux a aussi été réalisée (Fig. 41), en ne prenant en compte dans un premier temps que les flux issus des bassins versants urbanisés, qui sont les seuls, au cours de cette étude, à être caractérisés par des flux importants en coliformes fécaux à leur exutoire. Bien que les résultats obtenus soient cohérents avec les mesures réalisées sur le terrain par la DDASS, le laboratoire Pen-Avel de CAP Atlantique et l'Ifremer (concentrations maximales enregistrées à l'exutoire des bassins versants du Croisic, de la Croix de l'Anse, de La Baule et du sud de La Turballe), les apports

bactériologiques liés à l'agriculture devront être inclus dans le modèle ultérieurement afin de mieux le caler à l'amont.

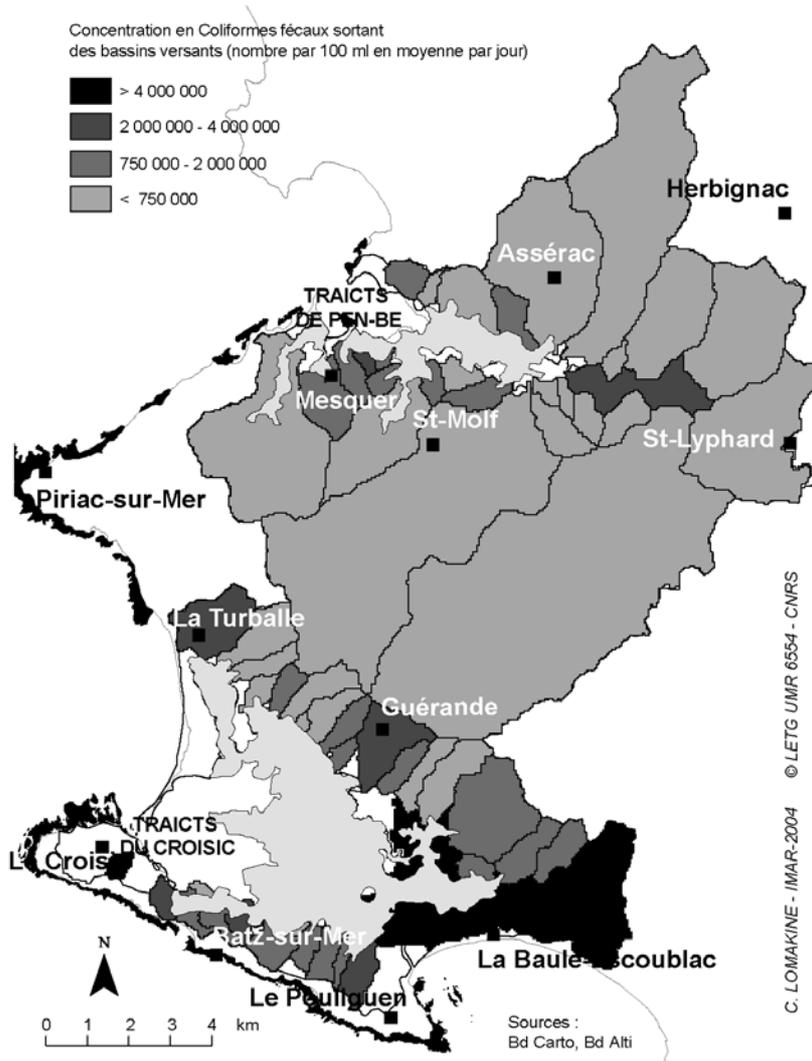


Figure 41. Simulation des concentrations en coliformes fécaux

Le modèle utilisé ici dans un contexte littoral a donné des résultats satisfaisants : il a confirmé les tendances observées et a permis de distinguer les bassins versants les plus polluants en dépit du petit nombre de points de mesure. Le choix des stations de Rejet 2000 et Torgouët (Le Croisic) et la Croix de l'Anse (La Turballe) se trouve ainsi validé.

Pour améliorer les résultats du modèle, on peut envisager de compléter les résultats acquis par la mise en place de points de mesure de la qualité des eaux à l'exutoire de cours d'eau ne connaissant pas de variations de salinité. Ces points permettront d'améliorer le calage du modèle, mais aussi d'optimiser la surveillance des apports continentaux. La figure 42 recense les points les plus intéressants à garder pour répondre à ces objectifs. Ils se

situent aux exutoires des bassins versants dont les flux modélisés ont montré des pics de contamination importants. Un suivi de ces points sur une période de deux ans, avec une intensification des prélèvements en périodes d'utilisation des phytosanitaires et lors d'épisodes pluvieux exceptionnels, pourrait permettre d'améliorer le calage du modèle, puis de l'utiliser comme un outil de prévision sur l'ensemble du secteur.

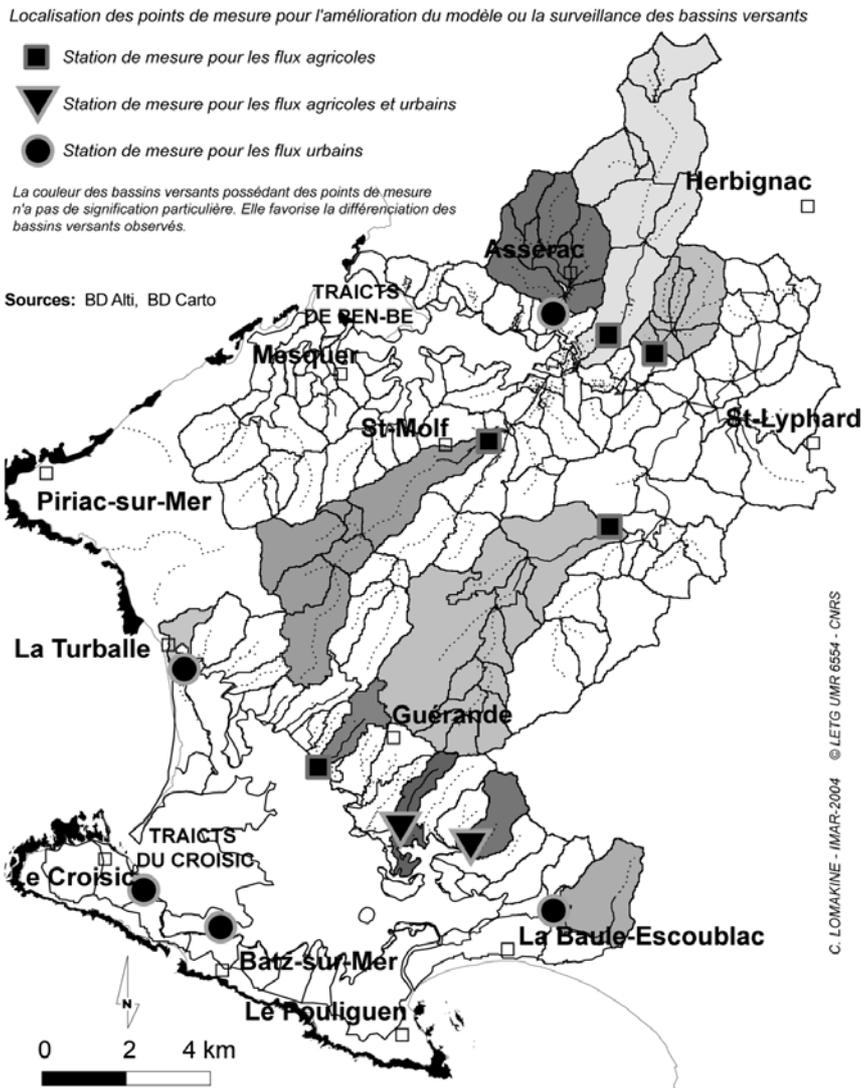


Figure 42. Proposition de localisation des points de mesure pour l'amélioration du modèle et la surveillance des bassins versants

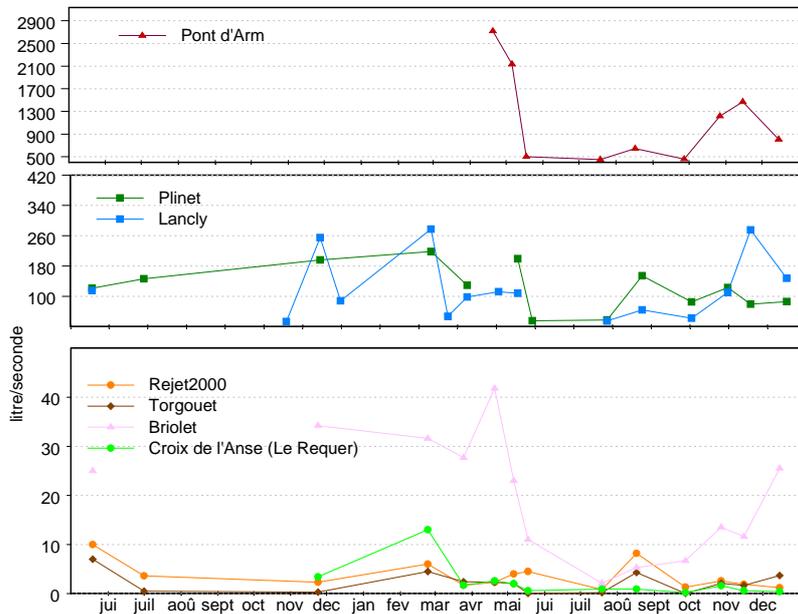
2. Caractéristiques physico-chimiques des étiers

2.1. Evaluation des débits

Les mesures de débits effectuées sur les étiers permettent de distinguer, sur les 7 points de suivis, trois types différents (Fig. 43) :

- l'étier de Pont d'Arm, le plus important, qui présente des débits allant de 500 à 2700 litres par seconde.
- les étiers de Plinet et de Lanclay, dont les débits mesurés sont compris entre 100 et 300 litres par seconde.

- les autres étiers et rejets (Rejet 2000, Torgouet, Briolet et Croix de l'Anse) où les débits sont compris entre moins de 10 litres et 40 litres par seconde.



On observe donc un facteur 10 à 100 entre les petits étiers et les plus importants. De manière générale, les débits enregistrés sont faibles sur les 7 stations de suivi, et les étiers ne contribuent que modestement à l'hydrodynamique des traicts (chapitre 1, §3.4). Ils peuvent toutefois véhiculer de fortes concentrations de polluants.

Figure 43. Représentation des débits mesurés sur les 7 points de suivi

2.2. Paramètres généraux de qualité

La température des étiers varie de façon saisonnière, en fonction des températures extérieures. Les températures les plus faibles sont observées de décembre à février (5 à 8°C), et les plus chaudes à partir de mai avec des valeurs supérieures à 20°C, pouvant atteindre 30°C dans les étiers les moins profonds.

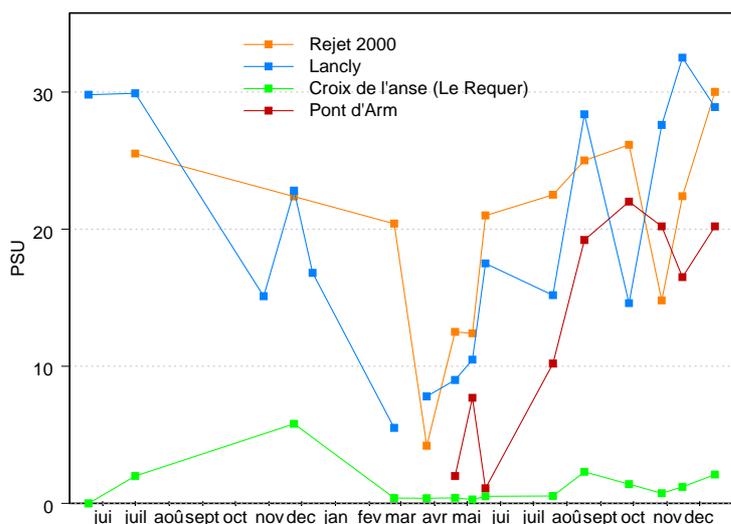


Figure 44. Evolution de la salinité dans plusieurs étiers en 2003 et 2004.

Certains étiers présentent toujours des salinités élevées (Plinet, Lanclay, Torgouet), en lien avec les apports continus d'eaux en provenance des marais salants. Seul le rejet de Croix de l'Anse n'est pas soumis à l'influence marine, et présente en permanence une salinité inférieure à 5 PSU⁹. Le rejet 2000, qui est en principe un rejet strictement pluvial, présente régulièrement une salinité variant de 12 à 25 PSU. Celle-ci pourrait s'expliquer soit par des raccordements sauvages d'eau de mer (Fig. 44), soit par la configuration du réseau d'eaux

⁹ PSU : Practical Salinity Unit, unité de salinité

pluviales qui favorise les remontées d'eau de mer à marée haute.

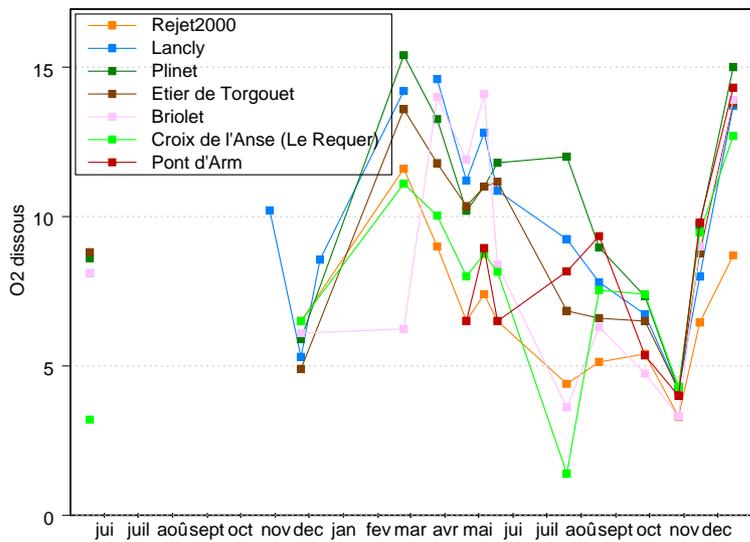


Figure 45. Suivi de l'oxygène dissous (mg/l) sur les sept stations, de juillet 2003 à décembre 2004

Le suivi de l'oxygène dissous ne révèle pas d'anoxie significative ; dans certains cas, la teneur en oxygène dissous diminue après un épisode pluvieux, ce qui pourrait s'expliquer par des apports, depuis le bassin versant, de substances consommatrices d'oxygène (Aminot et Kerouel 2004), en lien avec l'augmentation de la turbidité. Sur toutes les stations, les teneurs en oxygène dissous descendent au moins une fois sous le seuil critique de 5mg/L (Fig. 45) ; sur de longues périodes, de telles valeurs pourraient avoir des conséquences défavorables

pour le milieu. Toutefois, nous n'avons rien observé de tel pendant la période de suivi.

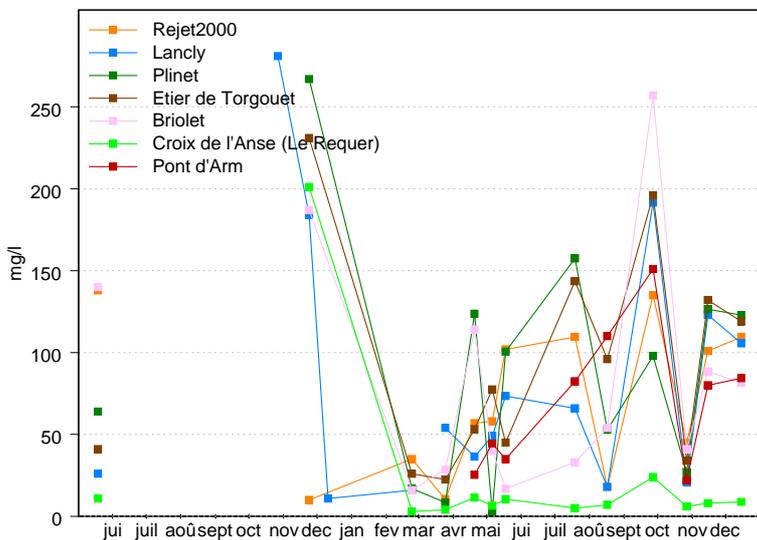


Figure 46. Suivi des MES sur les sept stations, de juillet 2003 à décembre 2004

Les mesures réalisées sur les matières en suspension (MES) en 2003 et 2004 confirment, pour toutes les stations suivies, l'augmentation des teneurs en MES après un épisode pluvieux, qui correspond à un lessivage des sols sur les bassins versants et à la remise en suspension des sédiments des étiers en amont. Les plus fortes valeurs enregistrées varient de 250 à 300 mg/l, tandis que les plus faibles sont inférieures à 10 mg/l (Fig. 46).

3. Mesure des apports dans les traicts¹⁰

3.1. nutriments

Les teneurs observées en nutriments sont faibles sur les 7 points répartis autour du traict du Croisic et celui de Pont d'Arm dans le traict de Pen Bé. Localement ces points de suivi sont surtout très différents et disparates en fonction de la pluviométrie.

On distingue des étiers pour lesquels l'augmentation des concentrations en nutriments est liée à l'augmentation des débits : c'est le cas des étiers de Lancly, Pont d'Arm (Fig. 47) , Briolet et Plinet.

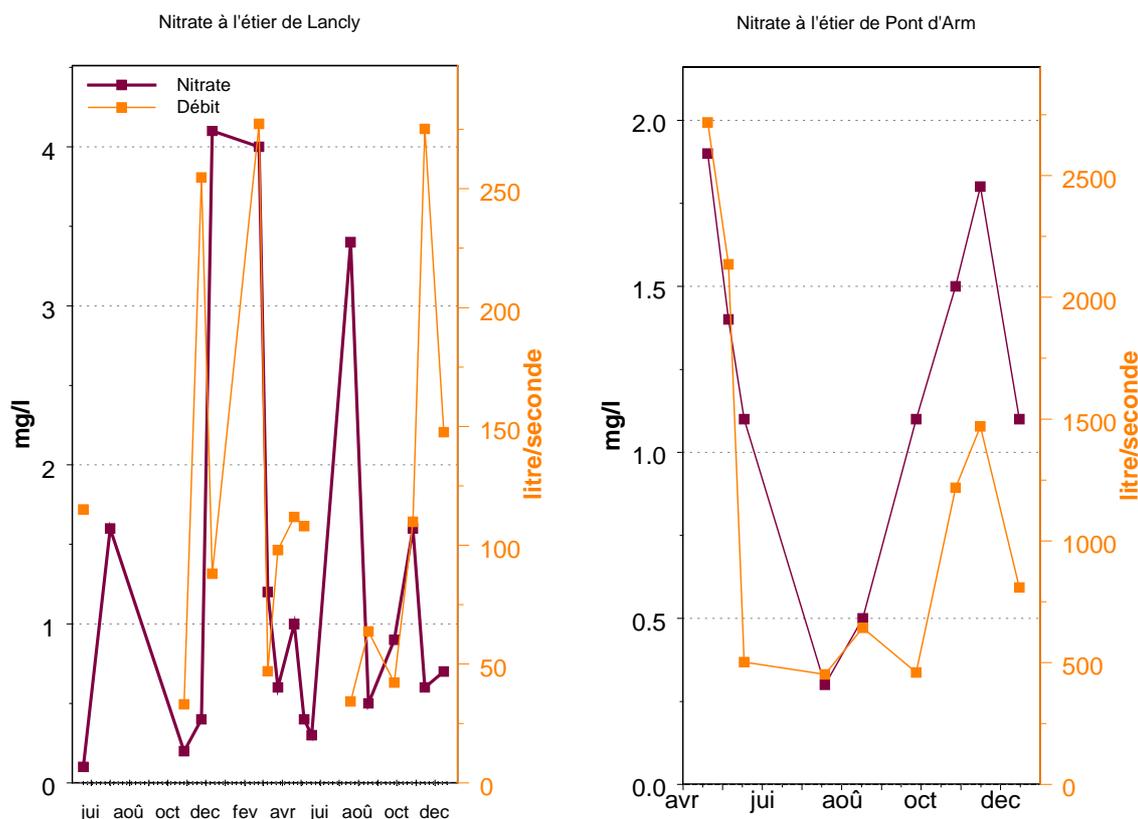


Figure 47. Evolution du nitrate dans les étiers de Lancly et de Pont d'Arm

Les autres étiers présentent des comportements plus aléatoires en fonction de la pluviométrie ou au contraire en l'absence de pluviométrie, ce qui indiquerait une présence d'apport de type rejet urbain (Rejet 2000, Torgouët et Croix de l'Anse-Le Requer, Fig. 48).

¹⁰ Les apports au milieu marin sont évalués habituellement par la mesure des concentrations à salinité nulle. Dans les secteurs étudiés ici, l'activité salicole est à l'origine d'une dilution des étiers par les eaux en provenance des marais salants ; de ce fait, les étiers ne présentent jamais une salinité nulle, à l'exception de la station Croix de l'Anse.

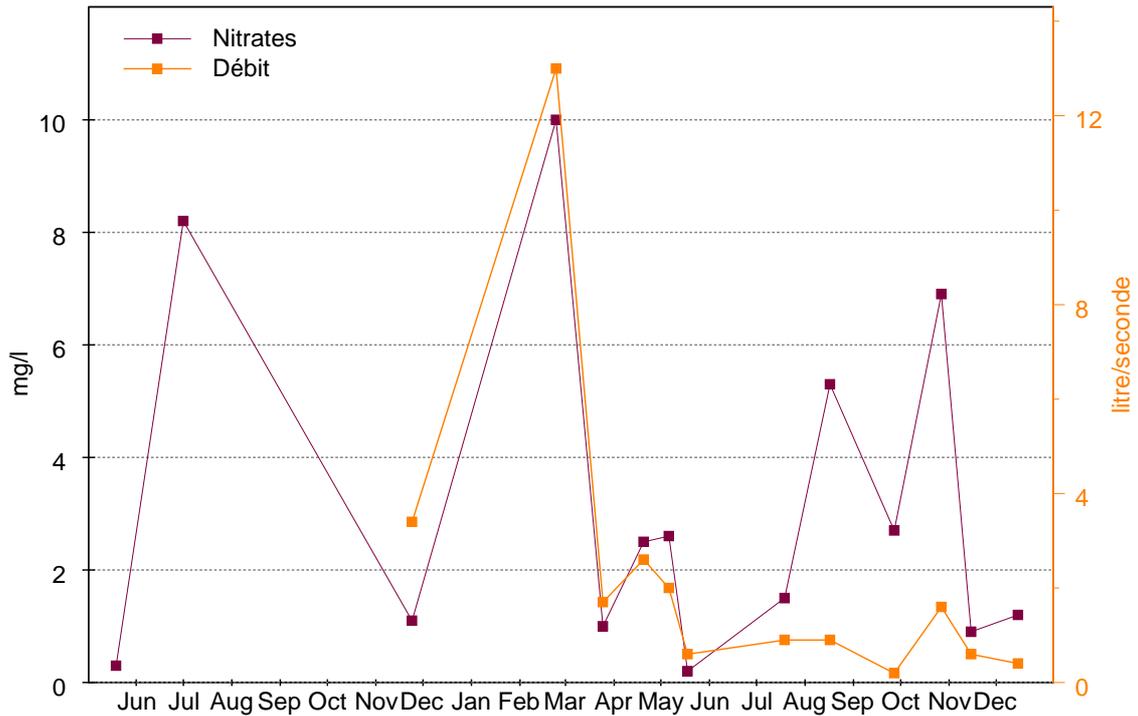


Figure 48. Evolution du nitrate dans le rejet du Requer (Croix de l'Anse)

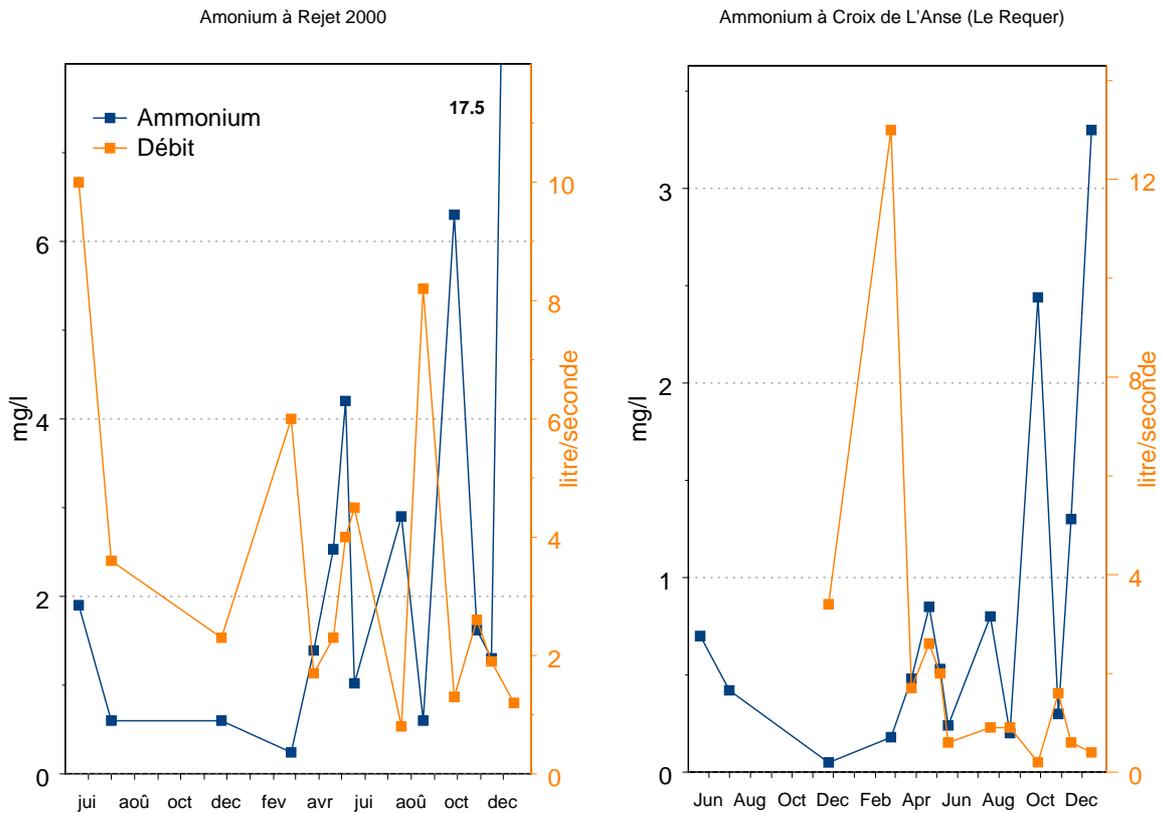


Figure 49. Evolution de l'ammonium aux stations Rejet 2000 et Le Requer-Croix de l'Anse

Les teneurs les plus importantes sont observées au point de Rejet 2000 pour l'ammonium(Fig. 49), caractéristique d'un rejet urbain. Pour le nitrate, les valeurs maximales

sont mesurées au rejet du Requer - Croix de l'Anse, et pour le phosphate, au Rejet 2000, à l'étiér de Briolet et à l'étiér de Pont d'Arm.

Toutefois, les concentrations en nutriments restent très faibles comparées aux observations réalisées en Bretagne notamment (Mortreux, 1999), et plafonnent à 6 mg/l, voire à 10 mg/l au Requer - Croix de l'Anse.

Les valeurs enregistrées pour les nutriments au cours de cette étude confirment les résultats obtenus par le laboratoire de Pen-Avel depuis 10 ans dans les étiérs et les traicts (Ponthoreau, 2003) et ne traduisent pas d'augmentation significative de ces paramètres. C'est pourquoi, la modélisation du devenir de ces apports n'a pas été entreprise pour le moment.

Compte tenu en particulier du faible renouvellement des masses d'eau au fond des traicts (chapitre 1, §3.3), il faudra néanmoins veiller à ce que ces apports n'augmentent pas, afin d'écartier tout risque d'eutrophisation. La modélisation des apports avec SWAT® a mis en évidence, sur les bassins versants, des points dont le suivi permettrait d'optimiser la surveillance des apports continentaux (Chapitre 3.1, Fig. 42). D'ores et déjà, on pourrait proposer de remplacer le suivi mensuel réalisé par le laboratoire de Pen-Avel sur plusieurs points des étiérs et des traicts par un suivi ciblé sur les points préconisés par le modèle, et calé sur les périodes de fertilisation, en augmentant éventuellement les fréquences pendant les périodes pluvieuses. D'autre part, et bien que ce secteur ne manifeste pour le moment aucun risque d'eutrophisation, il pourrait être intéressant de suivre plus finement le comportement des nitrates en période hivernale sur 2 ou 3 années consécutives.

3.2. bactéries

Le suivi du germe test *Escherichia coli* montre des fluctuations très importantes, classiquement observées dans le suivi de la contamination bactérienne dans l'eau. Il est certain que la fréquence mensuelle des prélèvements est insuffisante pour caractériser cette variabilité. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les coquillages sont utilisés par le réseau REMI comme intégrateurs de la qualité bactériologique du milieu (<http://www.ifremer.fr/envlit/surveillance/remi.htm>). Néanmoins, cette approche était nécessaire pour détecter les étiérs ayant le plus d'impact sur la qualité bactériologique des traicts, et le suivi mis en œuvre a contribué à donner des ordres de grandeur de la contamination bactériologique véhiculée par les exutoires retenus. Les contaminations

peuvent être très faibles ($10 E. coli/100 mL$), et atteindre des valeurs de $10^5/100 mL$. Les concentrations les plus importantes sont enregistrées à rejet 2000 et Croix de l'Anse (Le Requer), mais, compte tenu des débits mesurés, les flux instantanés les plus importants ont été mesurés à Pont d'Arm et Plinet (Fig. 50).

Ces mesures d'*E. coli*, qui ne prétendent pas donner une vision exhaustive de la contamination bactériologique des étiérs, ont néanmoins

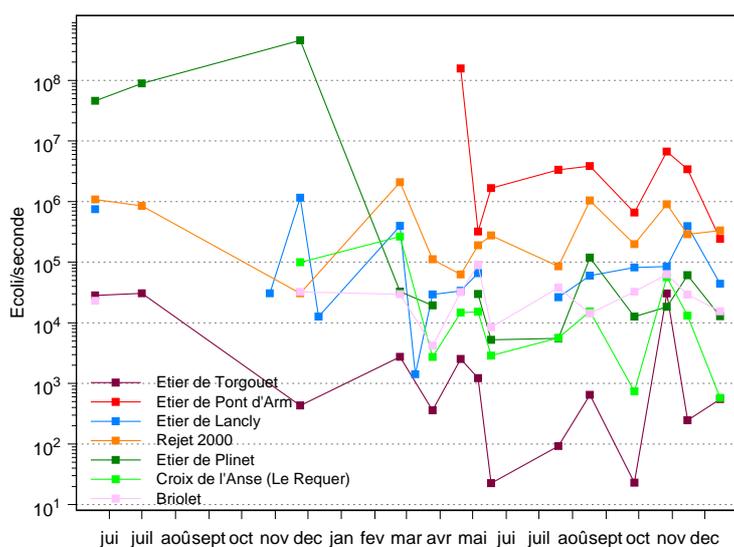


Figure 50. Flux instantané d'*E. coli* aux différents points de mesure

permis de confirmer, pour les bassins versants urbanisés, l'existence de secteurs à risque. D'autre part, les flux calculés ont été injectés dans les modèles hydrodynamiques afin de visualiser, à partir de valeurs réelles, le devenir de la contamination bactériologique dans les traicts.

Tous les résultats du suivi des étiers sont consignés dans l'annexe 17.

3.3. phytosanitaires

Sur plus de cent molécules recherchées, 31 ont été détectées au cours du suivi (Fig. 51 et annexe 18). Il s'agit essentiellement d'herbicides (on en dénombre 23 dont 14 sont essentiellement utilisées pour les cultures de maïs, blé et céréales d'hiver). Seuls deux insecticides et un fongicide ont été retrouvés dans les prélèvements. Enfin cinq molécules sont des produits de dégradation de l'atrazine, du glyphosate et de la terbuthylazine.

Les périodes où l'on détecte le plus grand nombre de molécules dans les cours d'eau correspondent essentiellement aux périodes d'épandage et de plus forte pluviométrie (avril à juillet 2004).

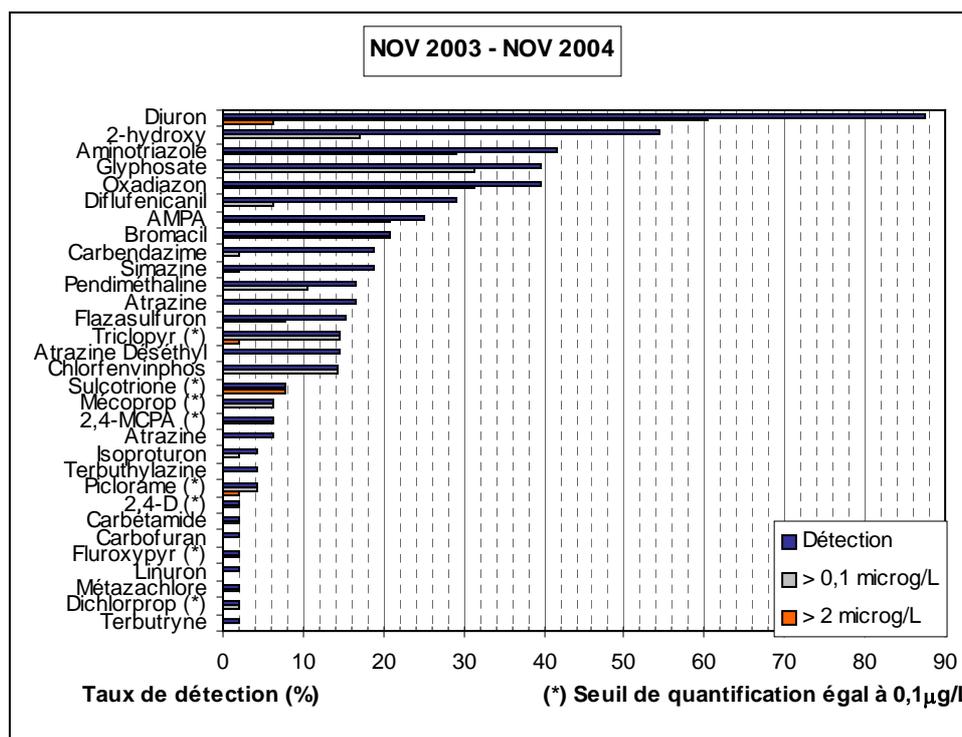


Figure 51. Taux de quantification des molécules détectées au cours du suivi 2003-2004.

D'après une enquête menée par CAP Atlantique ¹¹, les quatre molécules les plus utilisées par les communes sont également celles qui ont été le plus souvent détectées au cours du suivi (Fig. 51). Il s'agit du diuron (88%) qui a une origine urbaine (désherbage des espaces verts, talus,...), du glyphosate (40%), de l'aminotriazole (42%) et de l'oxadiazon (40%). Ce résultat montre le fort impact des pratiques communales sur la qualité du milieu dans la

¹¹ enquête sur la quantité de pesticides utilisés en 2000 par 9 communes de CAP Atlantique : Le Croisic, La Baule-Escoublac, La Turballe, Guérande, Piriac-sur-mer, Batz-sur-mer, Mesquer, St Lyphard et Le Pouliguen.

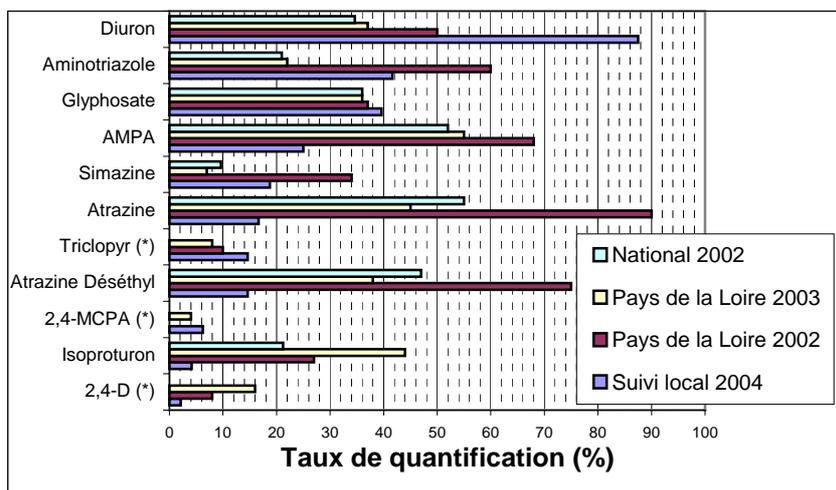
mesure où chaque substance utilisée, particulièrement en zone urbaine (lessivage des sols important), est retrouvée dans l'eau.

Parmi les substances détectées, cinq figurent sur la liste prioritaire établie par la Directive Cadre sur l'Eau (JOCE, Directive 2000/60/CE ; JOCE, Décision 2455/2001/CE). Cette liste comporte dix pesticides qui devraient faire l'objet d'un suivi systématique après la mise en place de la DCE (2007) : le diuron détecté de façon quasi-systématique, la simazine, l'atrazine, l'isoproturon et le chlorfenvinphos.

Parmi les matières actives retrouvées dans les prélèvements, quatre molécules sont concernées par les retraits d'usages déclarés en 2003 (directive 91/414/CEE) : le bromacile (avec une exception pour le désherbage de la lavande et assimilés jusqu'au 31 décembre 2007), le chlorfenvinphos (avec une exception pour la mouche de la carotte et du chou), la terbutryne (Autorisation de Mise en Marché non renouvelée car la substance active n'est pas inscrite à l'Annexe I de la dir. 91/414/CE) et le dichlorprop.

La terbutylazine est également interdite d'utilisation à partir du 30 septembre 2003 (Auby et Maurer, 2004). Son produit de dégradation, la terbutylazine deséthyl, a été détecté une fois aux stations de Croix de l'Anse et de l'étier de Pont d'Arm (27 octobre 2004).

La plupart des autres molécules font également l'objet de restrictions d'usages.



Mis à part le diuron, que l'on retrouve dans près de 90% des prélèvements réalisés, les autres substances actives présentent des taux de quantification le plus souvent inférieurs aux moyennes régionales et nationales (Crepepp, 2003 ; Ifen, 2000, 2002, 2003, Fig. 52).

Figure 52. Taux de quantification locaux, régionaux et nationaux de quelques molécules

L'étude des concentrations maximales relevées dans le milieu au cours du suivi indique une fois encore que les résultats obtenus, à l'exception de quelques molécules, s'inscrivent dans une cohérence régionale (tab. 5).

Parmi les neuf molécules utilisées pour cette comparaison, le tryclopyr (herbicide débroussaillant) présente au niveau local une concentration supérieure aux valeurs enregistrées en Pays de la Loire en 2002-2003 et en Bretagne entre 1996 et 1999.

Cinq molécules présentent des valeurs inférieures aux valeurs maximales régionales et deux autres (le glyphosate et l'aminotriazole) présentent des valeurs comparables. La forte concentration en diuron mesurée en 2004 à deux reprises (6,2 µg/l le 20 avril et 6,5 µg/l le 19 juillet dans Rejet 2000) n'a pas d'équivalent régional ; elle reste cependant inférieure au pic enregistré en Bretagne en 1998 (Eaux et Rivières de Bretagne, 2000).

tableau 5. Concentrations maximales relevées au cours du suivi local 2004, au niveau de la région Pays de la Loire en 2002 et 2003, et en région Bretagne entre 1996 et 1999 dans les eaux superficielles

Molécules	Suivi Local	Pays de la Loire (1)		Bretagne (2)
	2004	2002	2003	1996-1999
2,4-D	0,4	-	1,2	0,6 (1999)
Atrazine	0,1	1,3	s2,2	29,0 (1997)
Atrazine Déséthyl	0,1	0,6	-	0,3 (1997)
Isoproturon	0,1	2,9	0,9	7,7 (1999)
Glyphosate	1,8	1,1	1,5	3,4 (1998)
AMPA	1,5	1,6	1,5	-
Aminotriazole	1,4	1,1	0,9	2,7 (1999)
Triclopyr	2,2	-	0,8	0,4 (1998)
Diuron	6,5	3,1	1,3	15,8 (1998)

(1) Source Comite plénier CREPEPP, 2003 (2) Source ERB, 2000

Cependant, de telles valeurs restent délicates à comparer et interpréter du fait des variations hydrologiques d'une année à l'autre, qui influent sur les valeurs de concentrations mesurées. Ainsi, on peut s'attendre à un abaissement de ces valeurs par dilution en cas de forte pluviométrie. Les apports des bassins versants, décrits en terme de flux, seront quant à eux plus importants en période de forts débits des fleuves ou cours d'eau.

Comme pour les apports bactériologiques, ces mesures, à défaut de donner une représentation exhaustive de la réalité, nous renseignent sur les substances utilisées et les périodes d'utilisation, et valident également la détermination de bassins à risques par le modèle SWAT®. Les flux instantanés de phytosanitaires ont été introduits dans les modèles hydrodynamiques pour suivre le devenir de ces polluants dans les traicts.

L'ensemble des résultats du suivi des phytosanitaires est disponible en annexe 19.

4. Devenir des substances dissoutes dans les traicts

Les questions relatives à la qualité de l'eau variant selon le secteur étudié (Croisic ou Pen-Bé), les résultats obtenus seront présentés séparément.

Le traitement de la dispersion des polluants par MARS-2D est celui de traceurs passifs, à savoir des substances totalement dissoutes dans l'eau et sans interaction avec les sédiments. Les panaches de polluants sont uniquement calculés à partir de l'hydrodynamique par des équations de transport d'advection/diffusion.

Les phénomènes d'adsorption de polluants sur les matières en suspension (MES) ne sont donc pas pris en compte par le code de calcul, de même que les phénomènes de sédimentation ou de relargage qui peuvent jouer un rôle important dans les zones turbides et à fond vaseux (Annexe 12).

On s'appuiera surtout, pour cette partie, sur le germe témoin de contamination fécale *Escherichia coli*. Sa mortalité relativement rapide (de l'ordre de la journée), constitue un facteur supplémentaire à celui de la dilution pour limiter l'étendue du panache de dispersion. Le temps de simulation, sauf mention contraire dans le texte, a été fixé à 100h réelles, ce qui, compte tenu des temps de calcul, permet un grand nombre de simulations. La palette de

couleurs utilisée est basée sur les normes en vigueur pour le classement des zones de production conchylicoles (tab. 6).

tableau 6. Estimation des concentrations en *E. coli* dans l'eau correspondant aux normes en vigueur dans les coquillages pour le classement des zones de production conchylicoles

Catégorie	Nombre d' <i>Escherichia coli</i> /100mL			
	10	33	150	1500
A	≥90%	≤10%	0%	
B	≥90%		≤10%	0%
C	≥90%			≤10%
D				>10%

nb : dans ce tableau, on a choisi un facteur de 30 entre la concentration des *E. coli* dans 100 ml d'eau de mer et dans 100 g de chair de coquillages. C'est la valeur retenue par l'instruction ministérielle du 12 mai 1981, mais ce facteur peut varier en fonction des conditions de milieu, de la nature des germes et de la nature des coquillages et de leur état physiologique des coquillages (Lees et al., 1995).

4.1. Devenir des bactéries dans les traicts du Croisic

La démarche suivie pour ce secteur consiste à étudier la réponse spécifique du système côtier aux différents paramètres (vent, marée, flux), et ainsi à approfondir notre connaissance de son fonctionnement. On peut alors en déduire un scénario critique correspondant aux conditions les plus impactantes pour l'écosystème en place (en termes de contamination bactériologique).

Les mesures réalisées au cours de cette étude sont peu nombreuses et ne reflètent pas forcément l'ensemble des conditions rencontrées au cours d'une année. De plus, la modélisation des flux à partir de ces mesures ponctuelles conduit, dans les traicts du Croisic à une uniformisation très rapide des concentrations en bactéries et à des valeurs inférieures à 10 *E. coli*/100 ml. C'est pourquoi, afin de mieux comprendre l'impact du vent, de la marée ou de chacun des étiers, les simulations ont été réalisées avec des flux dont les ordres de grandeur sont 10^3 à 10^4 fois supérieurs aux flux mesurés (tab. 7).

4.1.1. Impact du vent et de la marée

Le modèle hydrodynamique permet de visualiser l'impact du vent et de la marée, mais aussi de caractériser les risques inhérents à chaque rejet. On a choisi un T90 (annexe 12) égal à 40h, qui correspond à une situation hivernale, donc pénalisante car moins propice à la mortalité des bactéries. Les quatre rejets et étiers pris en compte sont Rejet 2000, Torgouët, Plinet et Lancly (Fig. 20, chapitre 2.4.1). Les résultats sont comparés à ceux du réseau de surveillance REMI de l'Ifremer. Les points situés sur cette zone sont au nombre de 7 et sont rappelés sur la figure 10, chapitre 1.3.3.

tableau 7. Flux utilisés pour l'étude de l'influence du vent et de la marée dans les traicts du Croisic (= flux mesurés X 5000).

Station	R2000	Torgouët	Plinet	Lancly-Pont
Flux <i>E. coli</i> (u/s)	1,0E+09	3,0E+07	1,0E+08	3,0E+08

L'impact du vent et de la marée a été testé à partir d'un jeu de données existant. Trois conditions de vent ont été testées : Ouest-Sud-Ouest, Nord-Est (qui constituent les deux

directions les plus fréquentes) et Nord-Ouest, toutes pour une vitesse identique, égale à 4m/s (les valeurs les plus fréquemment mesurées entre 1971 et 2000 sont comprises entre 2m/s et 4m/s). Une simulation de référence a également été effectuée à vent nul. Un résultat visuel synthétique est présenté ci-dessous (Fig. 53). Les panaches de concentrations moyennées sur un cycle de marée complet sont superposés au cadastre conchylicole.

L'impact le plus significatif se fait sur la partie extérieure du traict, plus exposée. Le panache est alors clairement influencé par la direction du vent, avec par exemple une forte remontée vers le port de la Turballe en vent de secteur WSW (Fig. 53C).

A l'intérieur du traict en revanche, le vent va avoir tendance soit à diffuser une forte pollution sur l'ensemble du traict – plus de zones impactées en vent de NE (Fig. 53D), certainement en provenance de Lanclay et Plinet – soit à favoriser le confinement de certains secteurs, induisant une pollution plus prononcée à proximité du point de rejet. Et si certaines zones présentent des variations de concentrations d'une simulation à l'autre, les zones conchylicoles restent à peu de choses près impactées de la même manière. Seule les zones de Sissable et Barres de Pen Bron 2 semblent fortement dépendantes des conditions de vent. Cependant, l'ensemble des points de suivi du REMI semble légèrement moins contaminé lorsque les vents sont nuls (Fig. 53A), ou de secteur WSW (Fig. 53C), et confinent les pollutions en bordure des traicts, hors des zones conchylicoles.

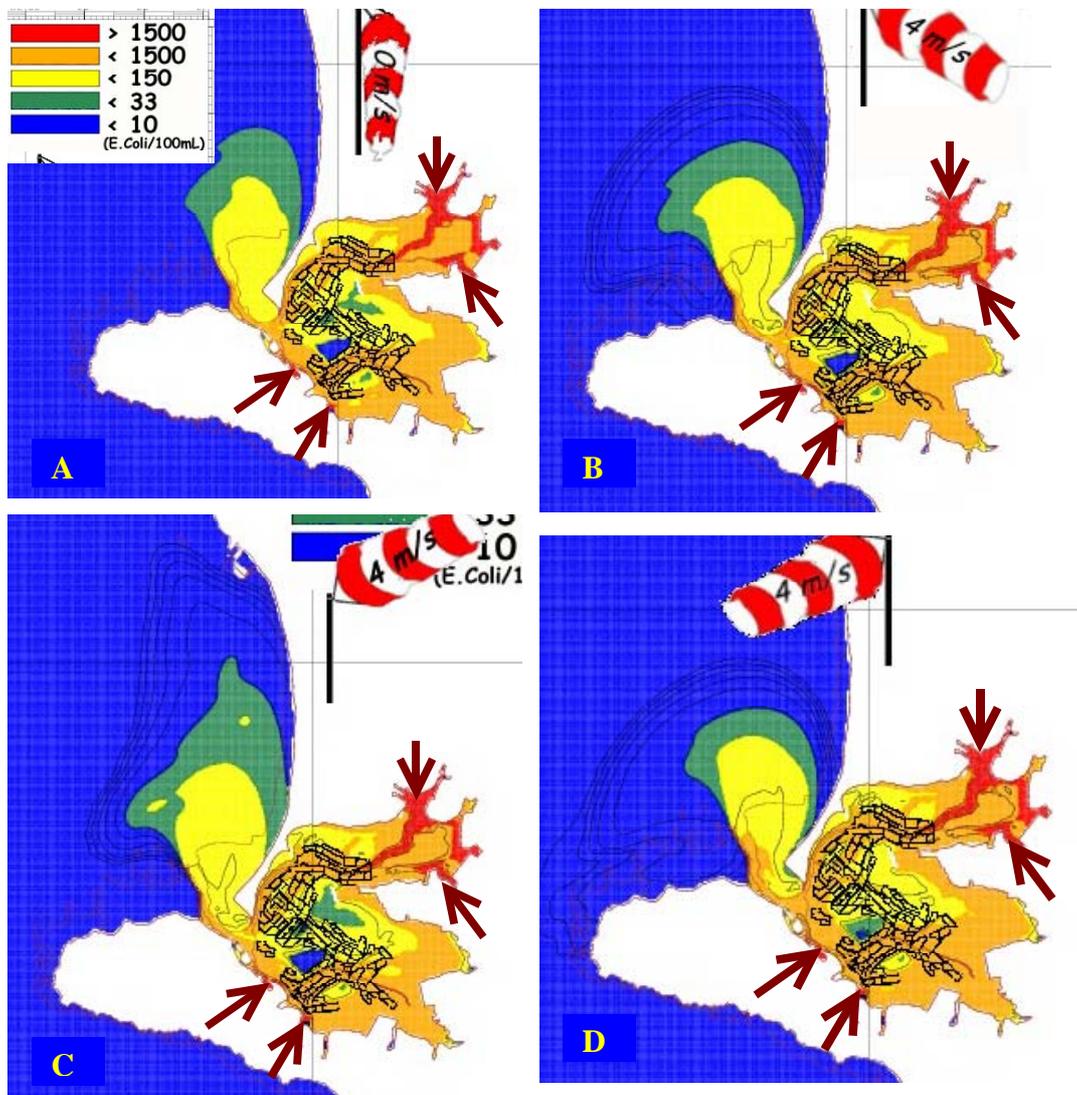


Figure 53. Concentrations moyennes en *E. coli* simulées sur un cycle de marée en fonction du vent (T90 = 40h, coefficient de marée 70)

Parallèlement, l'étendue du panache est fonction croissante du coefficient de marée (Fig.54), avec un fort impact à marée basse lorsque la dilution sur la colonne d'eau est la plus faible. L'impact est globalement moindre en période de morte-eau aux points de suivi du REMI ; néanmoins, le fort brassage en marée de vive-eau engendre une plus grande homogénéisation des concentrations à l'intérieur des traicts, et la qualité des eaux peut s'améliorer dans certains secteurs par fort coefficient.

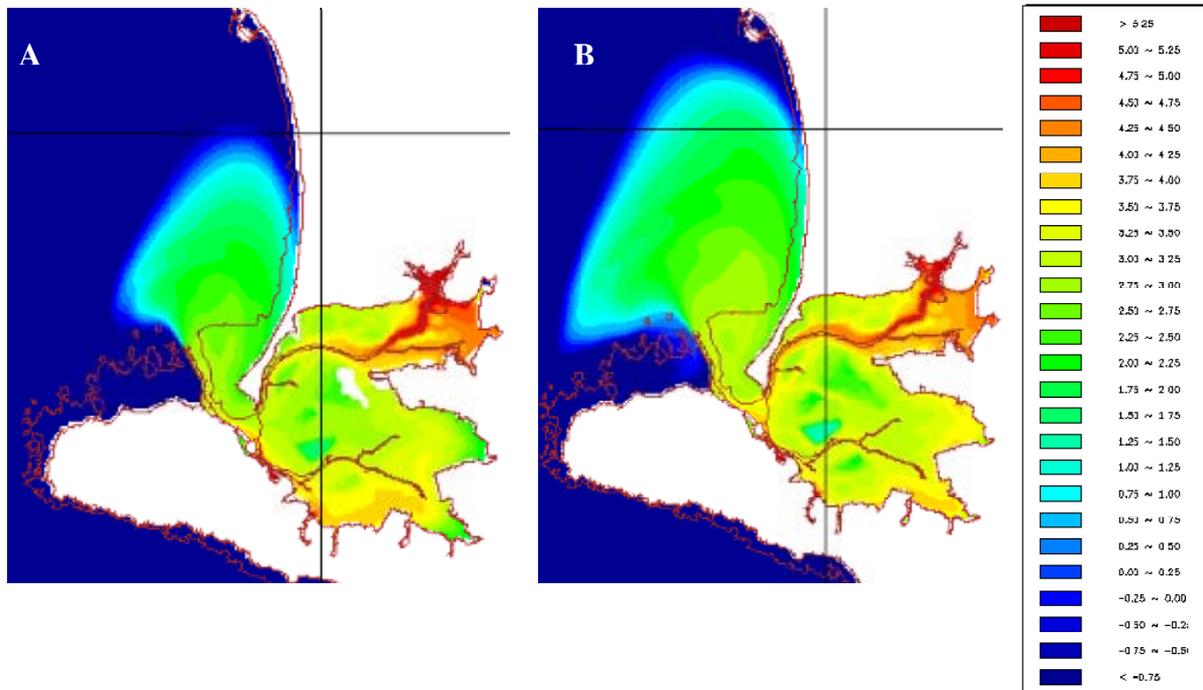


Figure 54. Concentrations moyennes en *E. coli* (log) simulées sur un cycle de marée en fonction du coefficient de marée (T90 = 40 h, vent nul)

4.1.2. Impact de chaque rejet

Parallèlement, il est intéressant de connaître l'impact spécifique attribuable à chaque rejet afin, d'une part de hiérarchiser les mesures à prendre pour améliorer la qualité de l'eau des étiers, et d'autre part de valider le choix des rejets suivis. Les simulations ont été effectuées pour un vent nul et un coefficient de marée égal à 70, d'abord avec des données réelles mesurées sur le terrain, puis avec un flux identique ($5 \cdot 10^8$ *E. coli*/s) appliqué à chaque rejet.

Avec les flux mesurés, on observe (Fig. 55), le plus fort impact (zone la plus étendue et concentrations les plus fortes) pour Rejet 2000 (Fig. 55A), le plus faible étant pour Torgouët (Fig. 55B), qui présente cependant un panache très étendu et dilué. Enfin, les zones touchées par les rejets issus des étiers de Plinet et de Lanclly sont assez similaires, le Petit Traict étant toutefois plus fortement touché par l'étier de Lanclly (Fig. 55 C et D).

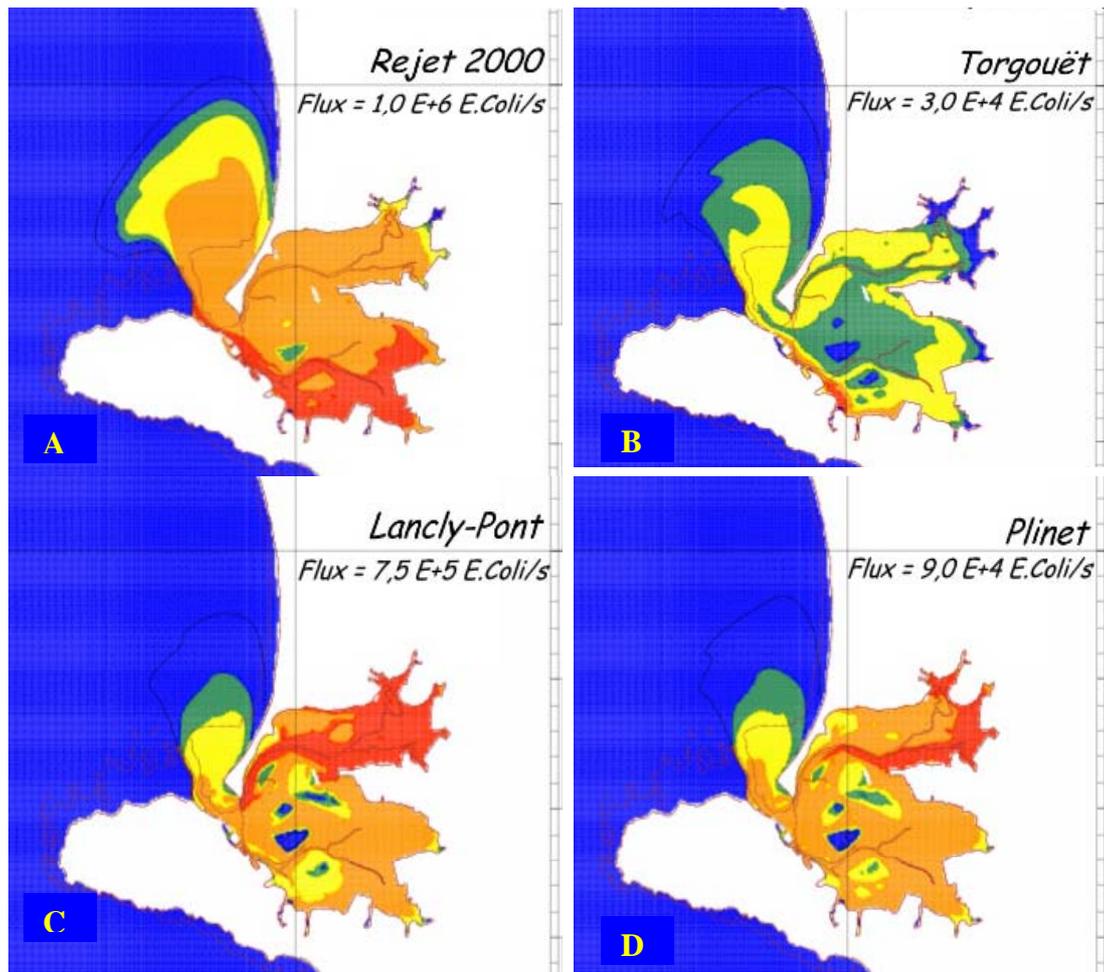


Figure 55. Concentrations moyennes simulées sur un cycle de marée (BM+PM) en fonction du point de rejet, pour des flux mesurés et multipliés par 5000 (vent nul, coefficient 70, T90 = 40h)

Les résultats du scénario avec un flux identique à chaque rejet (Fig. 56) nous apportent un supplément d'information important du point de vue de l'impact intrinsèque des rejets et de leur exposition aux courants. Alors que le Rejet 2000 est le plus impactant dans l'absolu, sa position enclavée dans le port en fait finalement, à flux égal, un des points de rejet les moins polluants pour le traict (Fig. 56A). L'étier de Torgouët présente quant à lui une situation diamétralement opposée. Sans discussion possible le moins polluant des étiers suivis, il s'avère présenter un risque de pollution bactériologique non négligeable, dans la mesure où il est exposé aux courants entrants et sortants, qui vont rapidement entraîner cette source de pollution et la diffuser à l'ensemble du traict.

Les concentrations sont alors très homogènes (Fig. 56B). Ainsi, bien que le suivi ne présente pas de problème majeur pour ce cours d'eau, sa localisation justifie à elle seule son intégration au programme de suivi des étiers. En ce qui concerne Lancly et Plinet, on se trouve face à des résultats encore différents. Lancly n'impacte de façon significative que le petit traict, alors que les apports en provenance de Plinet vont se diffuser davantage sur l'ensemble du site (Fig. 56 C et D).

L'annexe 20 donne une vision plus complète de l'évolution des concentrations en E. coli dans les traicts du Croisic, en fonction des variations du vent, du coefficient de marée, du T90 et du point de rejet.

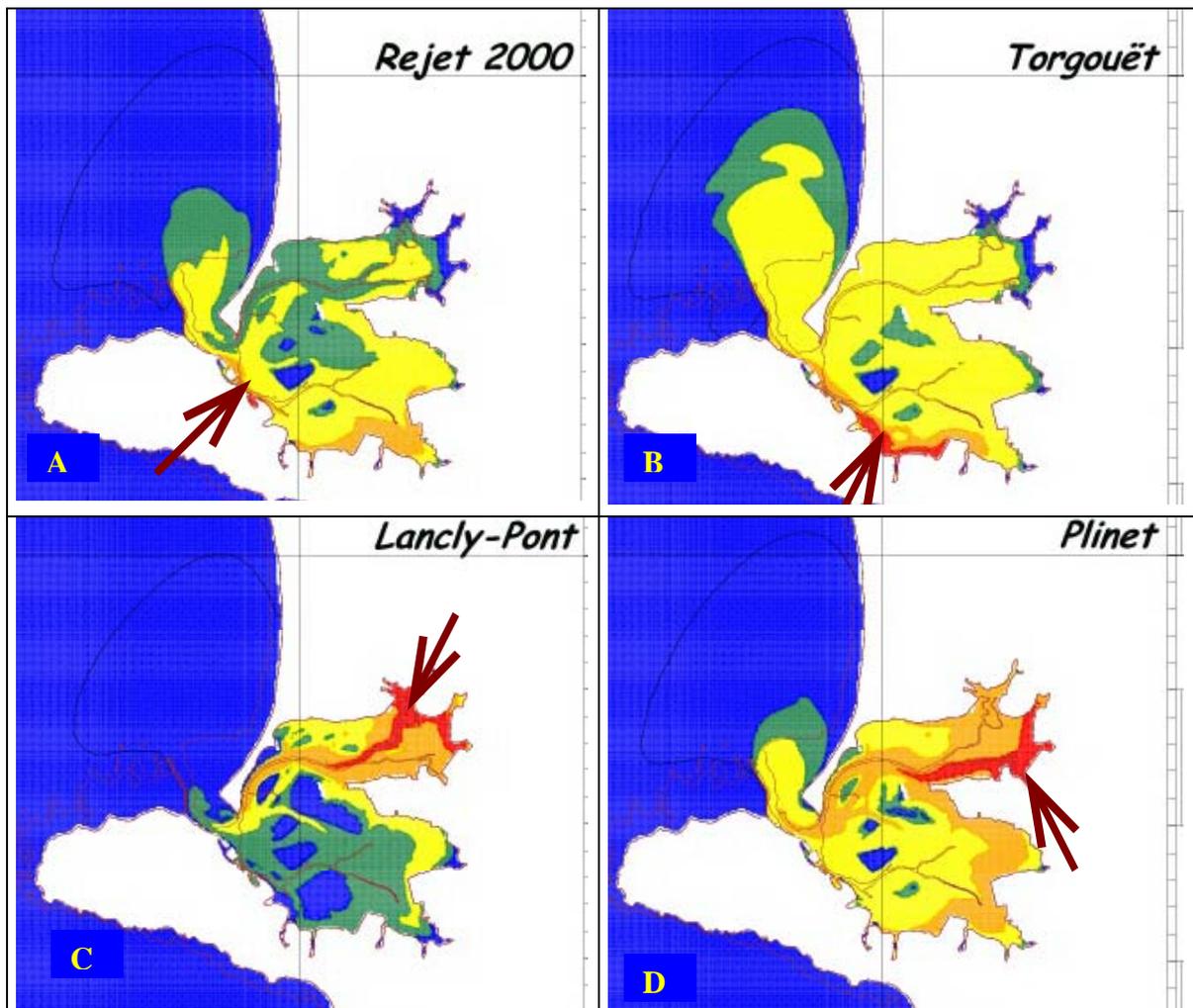


Figure 56. Concentrations moyennes simulées sur un cycle de marée en fonction du point de rejet et pour un flux donné de $5 \cdot 10^8$ E. coli/s (vent nul, coefficient 70, T90 = 40h)

Ainsi, que ce soit par leur situation géographique (enclavée, exposée ou à impact direct) ou par l'ampleur de leurs apports, le choix des étiers et rejet suivis, établi par Morin (2002) et Buchet (2003), s'avère être judicieux, et peut être considéré comme validé par l'étude hydrodynamique réalisée.

Toutefois, la comparaison entre les données du modèle et les mesures de flux bactériens enregistrées pendant l'étude ne permettent pas de reproduire la qualité bactériologique des coquillages observée par le réseau REMI, bien que les rapports de concentration d'un secteur à l'autre soient correctement reproduits. Plusieurs hypothèses ont été testées et pourraient expliquer cet écart :

- certains rejets ne sont pas répertoriés. Pour arriver à reproduire les niveaux de contamination bactériologique enregistrés par le REMI, il manque des apports équivalents à un rejet brut de 1000 équivalents-habitants. Des investigations supplémentaires devraient être conduites au niveau du rejet du centre hélio-marin de Pen-Bron et des rejets d'eaux pluviales suivis par le Service Maritime et de Navigation qui, au vu des résultats existants, ne présentent pas une concentration bactériologique suffisante pour expliquer ce manque ;
- la fréquence et les périodes d'échantillonnage n'ont pas permis de cibler les périodes pendant lesquelles la contamination bactériologique des étiers serait plus élevée et

pourrait expliquer le niveau de contamination chronique, quoique faible, des traicts du Croisic ;

- le T90 est mal évalué. La variation de ce paramètre va essentiellement jouer sur l'étendue du panache. La mortalité des bactéries constitue un facteur supplémentaire à celui – physique – de la dilution qui limite l'étendue du panache de dispersion. Des simulations montrent en effet des concentrations 3 à 10 fois supérieures selon que l'on utilise un T90 égal à 40 h ou 100 h. Ce résultat n'est qu'approximatif mais donne une idée de l'impact supplémentaire qu'ont ces mêmes rejets en saison hivernale. Ce facteur, s'il est mal évalué, nous empêche probablement de reproduire fidèlement le niveau de pollution observé à l'intérieur du traict ;
- une valeur unique de 30 a été choisie pour le coefficient d'accumulation entre l'eau et les mollusques ; or ce coefficient dépend des espèces de mollusques et de leur durée d'immersion. Il est donc possible qu'une part du déficit calculé en ce point soit produite artificiellement par une mauvaise évaluation de ce coefficient.

Si le niveau de pollution bactériologique enregistré par le REMI n'a pu être entièrement corrélé aux apports des étiers et rejets suivis dans le cadre de ce programme, il est cependant important de rappeler qu'il s'agit globalement d'une zone de bonne qualité dans laquelle les fortes contaminations bactériologiques sont épisodiques et fugaces.

4.2. Devenir des bactéries dans traict de Pen-Bé

Le suivi des apports dans le traict de Pen-Bé s'effectue uniquement pour l'étier de Pont d'Arm, qui représente par son débit, la principale source d'eau douce. L'hypothèse selon laquelle il en constitue également le principal apport de polluant a donc été posée. Il était important de s'en assurer au préalable.

Pour cela, une comparaison des résultats du modèle avec les données de qualité bactériologique (REMI) et de salinité (REPHY) a été effectuée, et plusieurs conditions aussi bien météorologiques qu'hydrauliques ont été testées. Les résultats du modèle ont été confrontés, dans un premier temps, aux valeurs issues du réseau de surveillance REMI, moyennées sur la période 1999-2003, et ramenées à une concentration pour 100mL d'eau (coefficient de 30 entre la chair des coquillages et l'eau). Les points de suivi situés sur cette zone sont au nombre de 5 et sont rappelés sur la figure 11, chapitre 1.3.3.

Une première simulation a été effectuée à coefficient de marée constant et égal à 95, pour un vent WSW de vitesse 4m/s. Pour le premier cas de figure, seul l'apport de l'étier de Pont d'Arm est pris en compte. Le flux entrant est égal à $1,6.10^8$ *E.coli*/s, et correspond au plus fort apport mesuré en 2004.

Contrairement au cas des traicts du Croisic, la pollution bactériologique est ici nettement discernable, et de l'ordre de grandeur de celle qui est observée sur les parcs d'élevage (Fig. 57). De plus, on trouve un bon accord entre le modèle et les mesures pour la majorité des points de contrôle, à l'exception du point *Traict de Pen-Bé* pour lequel on relève une sous-estimation du modèle, peut-être liée au fait que les coquillages échantillonnés sur ce point par le REMI sont des palourdes, coquillages fouisseurs, pour lesquels le coefficient de concentration de 30 est inadapté. La concentration au point « Le Frostidié » est légèrement surestimée par le modèle (REMI 8, modèle : classe 33-150) ; ceci pourrait être dû au fait que le flux injecté dans le modèle correspond au maximum enregistré au cours de l'étude et n'est donc pas forcément représentatif d'une situation moyenne.

La simulation montre bien une succession décroissante des valeurs entre le *Frostidié*, le *Rostu* et *Pointe de Pen Bé*, au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'aval de l'étier de

Pont d'Arm. Un léger apport est certainement négligé dans la Baie de Pont-Mahé, mais sans grand impact pour cette zone de bonne qualité sanitaire.

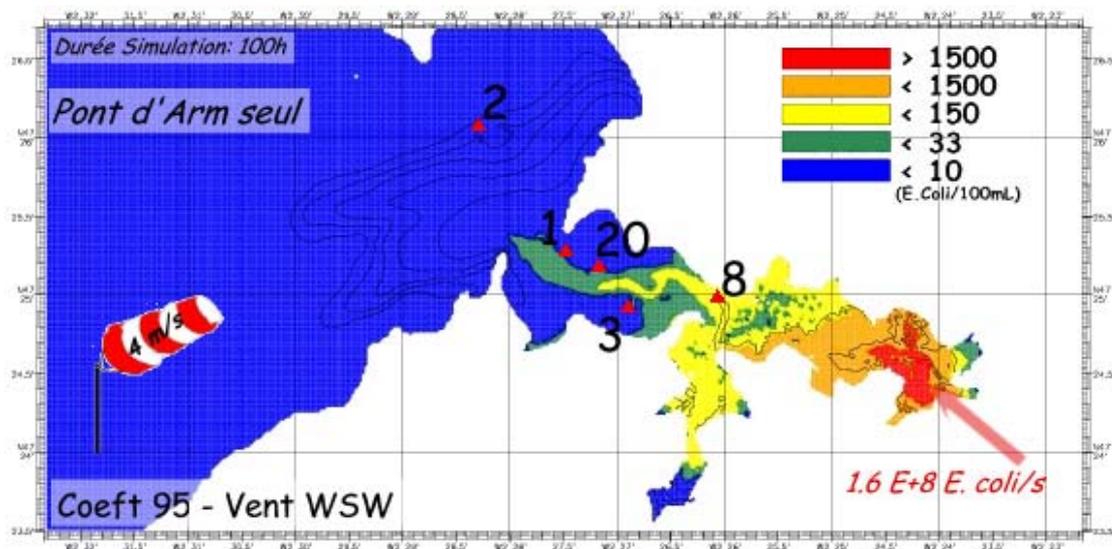


Figure 57. Concentrations moyennes sur un cycle de marée pour un apport unique de l'étierde Pont d'Arm – Concentrations en *E. coli* dans l'eau calculées à partir des données REMI 1999-2003 et d'un coefficient de concentration de 30.

La forte valeur (20) enregistrée au point *Traict de Pen Bé*, si elle peut être liée aux coquillages échantillonnés (palourdes), pourrait aussi témoigner d'apports bactériologiques supplémentaires par le bassin versant, non pris en compte dans le modèle puisque seul l'étier de Pont d'Arm a été retenu. Le réseau hydrographique ne présente pas de cours d'eau important dans cette zone et la courantologie locale, relativement simple, ne peut expliquer une telle accumulation de microorganismes. On peut donc s'interroger sur l'existence possible de déversements accidentels et non maîtrisés dans cette zone. Il pourrait s'agir de rejets d'eaux usées reliés par erreur au réseau d'eaux pluviales, ou de surverses sur des postes de relèvement à proximité immédiate du traict.

Un rejet d'eaux pluviales suivi par le SMN, *Kermalinge*, est situé à proximité. Son cas est étudié grâce à une simulation supplémentaire, qui inclut également le rejet d'eaux pluviales d'*Eclis* situé dans la partie Sud-Ouest de la baie de Pont-Mahé (Fig. 58).

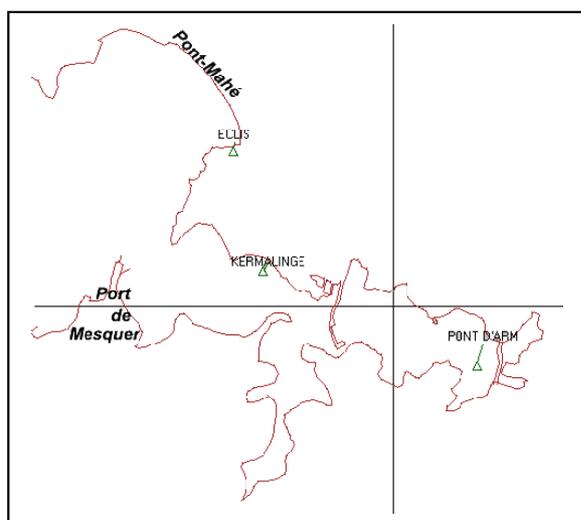


Figure 58. Situation des points de suivi *Kermalinge* et *Eclis*

Les valeurs de débit sont indisponibles pour le point de suivi *Eclis*. Nous avons choisi, arbitrairement, une valeur similaire à celles disponibles pour le point *Kermalinge*. Les flux introduits dans le modèle sont environ 10000 fois inférieurs à celui utilisé pour l'étier de Pont d'Arm. Les résultats ne présentent donc que peu d'amélioration par rapport à la situation précédente.

Ils ne représentent qu'un apport complémentaire, visible dans la partie Nord du Traict de Pen-Bé (Fig. 59) mais bel et bien négligeable.

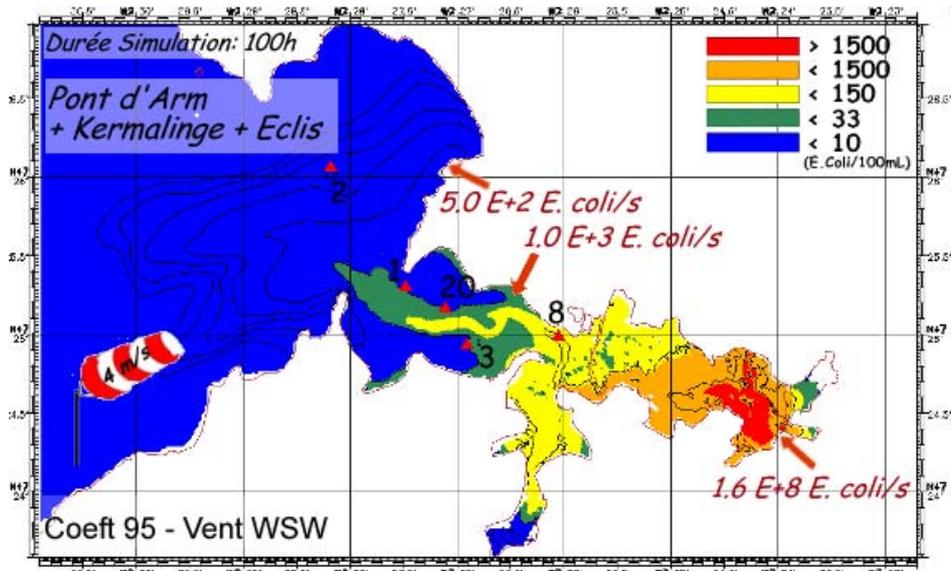


Figure 59. Concentrations moyennes sur un cycle de marée pour un apport conjoint de l'étier de Pont d'Arm et des rejets d'eaux pluviales *Kermalinge* et *Eclis* – Comparaison avec les données REMI 1999-2003

Une autre simulation fait intervenir l'étier du Boulay (Fig. 60). Le flux entrant est calculé pour une concentration en *E.coli* proche de celle observée dans l'étier de Pont d'Arm, et un débit égal à $0,5\text{m}^3/\text{s}$.

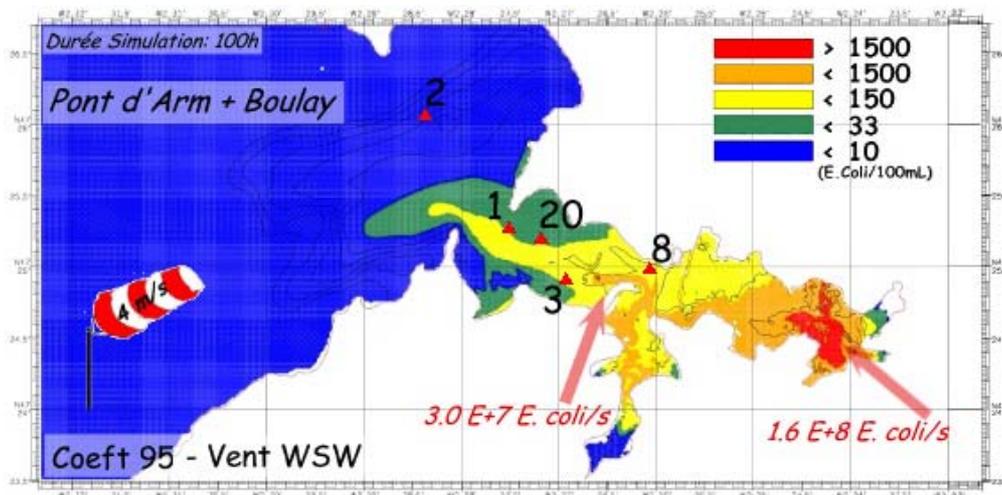


Figure 60. Concentrations moyennes sur un cycle de marée pour un apport conjoint des étiers de Pont d'Arm et du Boulay – Comparaison avec les données REMI 1999-2003

Un apport supplémentaire en aval de l'étier de Pont d'Arm reproduit donc plus fidèlement les valeurs mesurées. Dans ces deux simulations complémentaires, la modélisation indique que les apports des rejets de Kermalinge, Eclis et Boulay restent négligeables par rapport à ceux de l'étier de Pont d'Arm, ce qui permet de valider le choix de ce point unique pour l'évaluation des apports bactériologiques.

4.3. Devenir des produits phytosanitaires dans les traicts

Le suivi de l'impact des apports bactériologiques dans les traicts s'est appuyé sur les normes sanitaires en vigueur. De telles normes n'existent pas pour les produits phytosanitaires ; néanmoins certains d'entre eux sont connus pour leur rémanence en milieu marin et leur caractère toxique ; Auby et Maurer (2004) recensent les données d'écotoxicité pour plusieurs molécules détectées dans le bassin d'Arcachon, et dont certaines ont été retrouvées dans cette étude. En prévision de l'application de la DCE (2007), qui vise la bonne qualité chimique et écologique des masses d'eau, des Normes de Qualité Environnementale (NQE) sont en cours de définition (Marchand *et al.*, 2004). Pour le milieu marin, elles ne sont pas toutes définies à l'heure actuelle, et lorsque ces valeurs existent, elles seront comparées aux valeurs rencontrées ou simulées dans cette étude. Il faut préciser que le calcul des NQE ne se base que sur la toxicité potentielle d'une seule molécule et non sur un cocktail de substances dissoutes ; il existe en effet très peu d'informations sur la toxicité de ces mélanges.

Deux périodes hydrologiques ont été simulées pour chaque site. Les flux entrants sont ceux mesurés lors du suivi 2004. Seules quatre NQE provisoires sont disponibles pour les molécules détectées dans les cours d'eau du suivi : il s'agit du diuron, de l'isoproturon, de l'atrazine et du chlorfenvinphos.

4.3.1. Dispersion dans les traicts du Croisic

Seul le cas du diuron est traité dans ce secteur ; il s'agit en effet de la seule substance détectée régulièrement, et à fortes concentrations (jusqu'à 6,5µg/L dans le Rejet 2000 en avril et juillet 2004), sur l'ensemble des 4 points de suivi intérieurs aux traicts (Rejet 2000, Torgouët, Plinet et Lanclly-Pont).

Les périodes simulées sont celles des mois d'avril et septembre 2004, pour lesquelles nous avons mesuré respectivement les flux les plus importants et les plus faibles (tab. 8). Les données météorologiques 2004 du sémaphore du Talut ont été utilisées.

tableau 8. Flux extrêmes de diuron mesurés sur le bassin versant guérandais en 2004

	R2000	Torgouët	Plinet	Lanclly
Flux de Diuron mesurés aux point de suivi (g/jour)	0,004 ~ 1,23	0,0002 ~ 0,47	0,096 ~ 1,12	0,11 ~ 4,45
Apport total (g/jour) - Etiage ~ Crue	0,11 ~ 6,87			

Les concentrations extrêmes calculées en quatre zones des traicts (le chenal d'accès, le port du Croisic, le Grand Traict et le Petit Traict) sont reportées dans le tableau 9 pour chaque période hydrologique. Les concentrations calculées pour la période de crue étudiée dépassent, pour deux des quatre zones, la norme provisoire de 200ng/L (zones rouges Fig. 61).

Cependant, il s'agit de zones très localisées, à proximité immédiate des principaux exutoires que sont Rejet 2000 et Lanclly.

tableau 9. Concentrations extrêmes calculées sur la zone des traicts du Croisic en 2004

Zones impactées		Chenal	Port	Gd Traict	Pt Traict
NQE		200 ng/L			
Concentrations calculées sur la zone des traicts (ng/L)	Etiage	< 0.1 ~ 0.25	0.2 ~ 10	< 0.1 ~ 0.25	< 0.1 ~ 25
	Crue	2.5 ~ 25	60 ~ 2800	< 1 ~ 15	1 ~ 400

La figure 61 représente les concentrations maximales en diuron en période de crue, et montre une présence significative de cette substance dans les traicts. En revanche, l'impact est très faible sur l'ensemble de la zone en période d'étiage (Fig. 62).

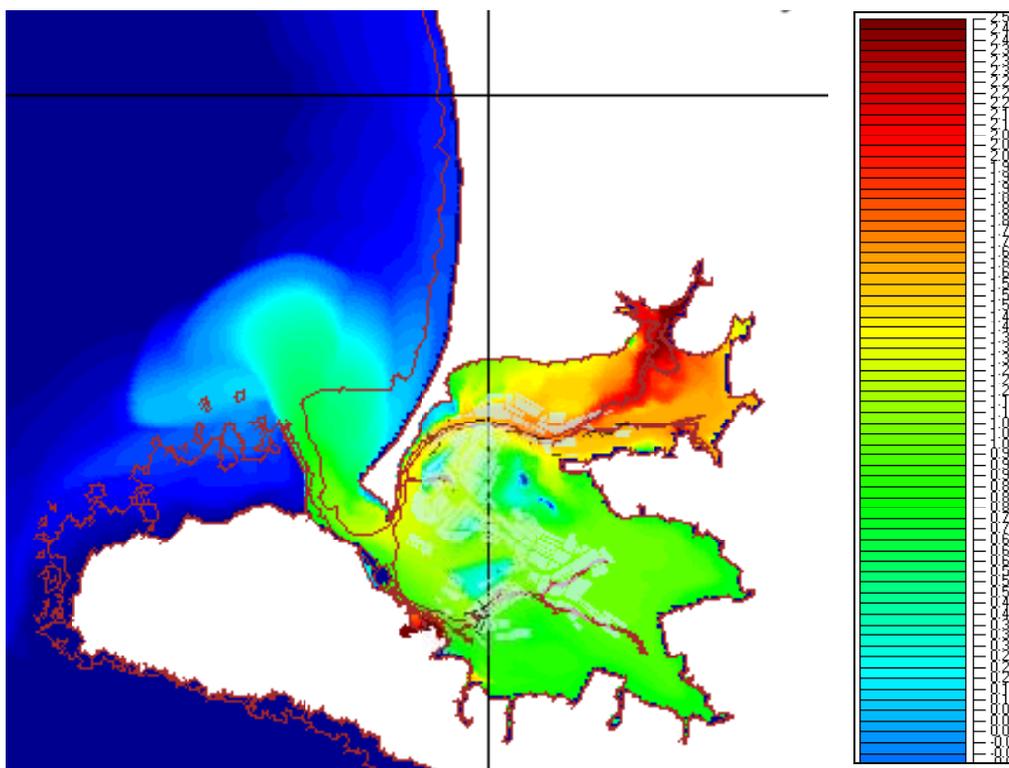


Figure 61. Concentrations maximales en diuron (ng/l, échelle Log) simulées par le logiciel MARS-2D en période de crue (avril 2004) – Cadastre conchylicole en surimpression.

Malgré tout, la présence quasi-systématique, et à fortes concentrations, de diuron dans les échantillons du suivi des étiers est problématique. Il est essentiel, pour la préservation de l'écosystème en place, d'être vigilant vis-à-vis de ces pollutions chimiques, et de renforcer les mesures préventives, qui permettront d'éviter que de telles substances se retrouvent, en quantités importantes, dans le milieu aquatique.

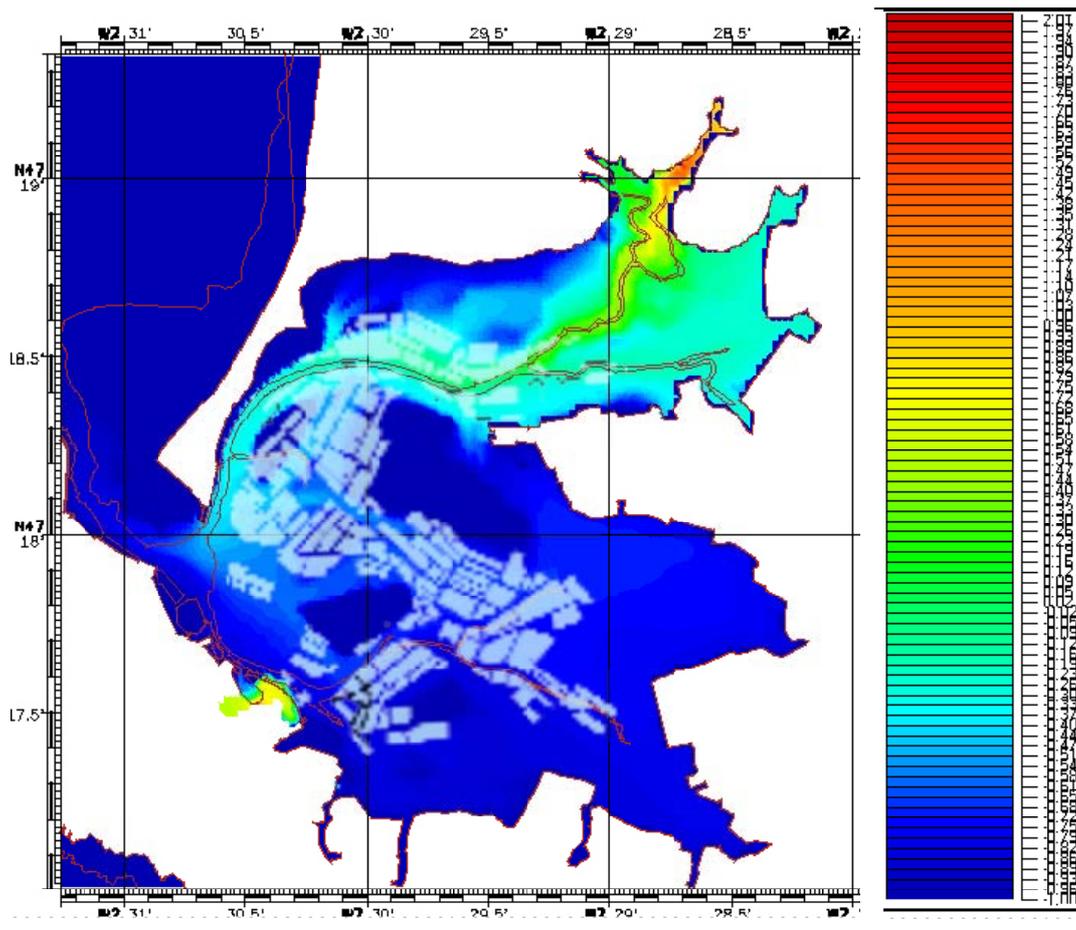


Figure 62. Concentrations maximales en diuron (ng/l, échelle Log) simulées par le logiciel MARS-2D en période d'étiage (septembre 2004) – Cadastre conchylicole en surimpression

La contribution respective de la Loire et des étiers à la contamination des traicts du Croisic a été évaluée sur la base des simulations présentées au chapitre 1.3.5.

Des données du suivi de la qualité des eaux de la Loire sont disponibles sur le site <http://hydro.rnde.tm.fr/accueil.html>. Cependant, les données disponibles les plus récentes sont celles de 2002. On a donc utilisé, dans l'hypothèse (certes discutable) de conditions hydrologiques et de concentrations en substances dissoutes similaires entre 2002 et 2004, les valeurs de flux connues pour cette période.

Le transfert des polluants entre l'estuaire et le Croisic pouvant se faire sur plusieurs semaines, nous avons choisi d'associer les données du suivi de la Loire du mois d'avril (2002) à celles du suivi des pesticides dans les étiers du mois de mai (2004).

Dans le cas particulier du diuron (présent dans près de 90% des échantillons du suivi réalisé, parfois à de très fortes concentrations), on observe par rapport au panache de la Loire un facteur de concentration allant de 4 pour l'étier de Plinet, à plus de 200 pour Rejet 2000 où l'on a mesuré une concentration égale à 6,2 µg/L (6200 ng/L) en mai 2004. L'impact des étiers sera donc prépondérant à leur proximité immédiate, tandis que des zones plus éloignées subiront essentiellement l'influence de la Loire. Ces variations dépendront fortement des conditions de marée, hydrologiques, et météorologiques de la période étudiée.

Dans notre cas, qui se situe dans une période de transition entre crue et étiage, la concentration en diuron calculée au point REPHY du Croisic (Fig. 14, chapitre 1.3.5) semble plus dépendante des apports locaux que des apports ligériens (dans l'hypothèse d'apports similaires en 2002 et 2004).

La méthode indirecte d'évaluation des apports de la Loire exposée au chapitre 1.3.5 a été appliquée pour les dates du 26 avril et du 3 Mai 2004. Les valeurs de salinité, mesurées par le REPHY d'une part et calculées par le modèle d'autre part, permettent de déduire une plus forte influence des étiers à la date du 3 Mai, contre des apports équivalents à la date du 26 avril.

Les calculs s'appuient sur une concentration en diuron égale à 30 ng/L dans l'estuaire de la Loire, et comprise entre 130 et 460ng/L pour les étiers. Ces deux dernières valeurs correspondent aux concentrations mesurées lors de la campagne du 20 avril 2004, respectivement dans les étiers de Plinet et Lançly. Compte tenu de leurs débits respectifs, ces cours d'eau représentent à eux deux 99% des apports d'eau douce locaux quantifiés. Leur apport a donc été jugé prépondérant, malgré la forte concentration relevée dans le Rejet 2000 (6,2µg/L).

On trouve alors, au point Le Croisic et à la date du 3 Mai, une contribution des eaux de la Loire équivalente à 2ng/L, quand celle des étiers est de l'ordre de 14 ng/L. L'apport de la Loire est donc, en ce point et à cette date, minoritaire en terme de concentration. La salinité observée au point « Le Croisic » est de 31,9 PSU.

En revanche, à la date du 26 avril, les contributions sont de 6 ng/L et 11 ng/L, respectivement pour la Loire et les étiers. L'influence de la Loire y est donc comparable aux apports locaux. La salinité égale, à cette date, à 27,5 PSU, marque en effet un fort apport d'eau douce dans la zone d'étude, alors que la pluviométrie locale est quasiment nulle les jours précédents. La part des eaux ligériennes dans les eaux douces des traicts du Croisic est telle que la Loire a rapidement un impact équivalent à celui des étiers.

4.3.2. Dispersion dans le traict de Pen-Bé

Les conditions hydrologiques et météorologiques des périodes simulées sont résumées dans le tableau 10.

tableau 10. Paramètres environnementaux des périodes simulées

Période hydrologique	Vents dominants	Coefts marée		Débit moyen (m ³ /s)
		Min	Max	Pont d'Arm
Etiage	WNW 1 ~ 7 (m/s)	50	89	0,5
Crue	SSW 8 ~ 17 (m/s)	39	103	2

Les débits utilisés pour l'étier de Pont d'Arm correspondent à l'ordre de grandeur des débits mesurés de mai à septembre 2004 pour la période d'étiage, et à ceux mesurés en avril et mai 2004 pour la période de crue.

Certaines molécules comme l'atrazine ou le chlorfenvinphos ont été détectées ou recherchées à une seule occasion dans l'étier de Pont d'Arm. Dans certains cas, un flux théorique a donc été utilisé afin de compléter le jeu de simulations. Les flux mesurés ou théoriques (donnés en période d'étiage et de crue) sont indiqués dans le tableau 11. Le

modèle permet de calculer les concentrations extrêmes que l'on peut s'attendre à trouver sur le secteur et que l'on compare aux NQE provisoires.

tableau 11. Concentrations extrêmes calculées sur le secteur de Pen-Bé (Baie de Pont-Mahé et zone des traicts)

		Diuron	Isoproturon	Chlorfenvinphos (*)
Flux mesurés à Pont d'Arm au cours du suivi (g/jour)		1,6 ~ 70,5	0,9 ~ 25,8	6,1 ~ 35(**)
NQE (ng/L)		200	320	60
Concentrations calculées dans le secteur de Pen-Bé (ng/L)	Etiage	0,004 ~ 7	0,002 ~ 4	0,01 ~ 25
	Crue	0,2 ~ 130	0,08 ~ 47	0,1 ~ 64
(*) Recherché une seule fois		(**) Flux théorique		

Dans tous les cas, les concentrations calculées dans le secteur de Pen-Bé restent inférieures aux NQE, et les concessions sont globalement situées, à pleine mer, dans une zone de bonne qualité, dans le cas d'un apport unique par l'étiage de Pont d'Arm. Toutefois, un flux de chlorfenvinphos supérieur à 30 g/jour pourrait conduire localement à un dépassement de la NQE en période de crue.

De ces résultats (tab. 11), on peut déduire une concentration maximale d'apports, au-delà de laquelle les NQE sont dépassées dans tout ou partie du secteur. Ces concentrations ont été calculées pour des débits d'étiage et de crue respectivement égaux à 500 L/s et 2000 L/s, et sont présentées dans le tableau 12. Elles sont exprimées en µg/L. A titre de comparaison, le flux de diuron mesuré au cours de cette étude en période de crue (70g/j), correspondrait à une concentration en diuron de 0,41 µg/L pour un débit de 2000L/s. La norme de qualité environnementale pourrait donc être rapidement atteinte puisque dans ce cas, la concentration limite est égale à 0,64 µg/L).

tableau 12. Concentrations seuil à Pont d'Arm (étiage et crue) au-delà desquelles les NQE seraient dépassées dans le secteur de Pen-Bé.

		Diuron	Isoproturon	Atrazine	Chlorfenvinphos
NQE (µg/L)		0,2	0,32	0,6	0,06
Concentrations	Etiage (Q=500L/s)	1,11	1,78	3,34	0,34
seuil (µg/L)	Crue (Q=2000L/s)	0,64	1,02	1,91	0,19

Afin d'évaluer l'impact respectif de l'étiage de Pont d'Arm et de la Vilaine sur la contamination du traict de Pen-Bé par les phytosanitaires, les simulations du chapitre 1.3.6 ont été affinées. L'estuaire de la Vilaine est couvert par le modèle hydrodynamique mis en place sur le secteur de Pen-Bé. Il est donc possible de simuler le devenir des contaminants qui en sont issus à partir des données de débit et de concentration existantes. L'Institution d'Aménagement de la Vilaine (IAV) réalise des mesures régulières de nitrate, ammonium, et divers pesticides dans les eaux de la Vilaine qui servent à l'alimentation en eau potable du secteur (usine de Férel, Morbihan). La connaissance des débits journaliers de la Vilaine permettra donc de calculer, pour les paramètres existants, les flux moyens et de les injecter dans le modèle de Pen-Bé afin d'évaluer l'incidence de la Vilaine sur le traict. Il faut rappeler ici que le modèle utilisé ici est un modèle 2D, et qu'il reproduit sans doute moins fidèlement la réalité qu'un modèle 3D, surtout en période de crue. Il donne néanmoins des indications intéressantes sur les impacts respectifs de la Vilaine et de l'étiage de Pont d'Arm.

Deux simulations, correspondant à deux situations hydrologiques distinctes, ont ainsi été effectuées. Ces deux périodes permettent d'appréhender deux situations très différentes, tant au niveau des apports que des conditions climatiques.

Les conditions environnementales (marée, vent, débits) sont indiquées dans le tableau 13. Pour le diuron, les concentrations utilisées correspondent aux valeurs enregistrées pendant l'étude. L'atrazine n'a pas été détectée à Pont d'Arm¹², mais une concentration théorique identique à celle de la Vilaine a été simulée pour un polluant conservatif ayant le même comportement que l'atrazine ou le diuron. Cela permet de comparer les apports respectifs de la Vilaine et de l'étier de Pont d'Arm pour différentes conditions météorologiques et hydrologiques.

tableau 13. Paramètres environnementaux des périodes simulées

Période hydrologique	Vents dominants	Coefts marée		Débit moyen (m ³ /s)		Substance suivie	Concentrations (ng/L)	
		Min	Max	Vilaine	Pont d'Arm		Vilaine	Pont d'Arm
Etiage	WNW 1 ~ 7 (m/s)	50	89	23	0,5	Diuron	140 ~ 210	310 ~ 130
Crue	SSW 8 ~ 17 (m/s)	39	103	433	2	Polluant conservatif	70	- Test à 70

Le résultat des simulations (tab. 14) montre que les apports de la Vilaine sont comparables à ceux de l'étier de Pont d'Arm en période de crue. En revanche, ils sont négligeables à l'étiage, et ce malgré des vents dominants (WNW) favorables au transfert de polluants (Fig. 63 et 64).

tableau 14. Concentrations calculées en Baie de Pont-Mahé et sur la zone des traicts

Contribution (ng/L)	Période hydrologique & Zone impactée			
	ETIAGE		CRUE	
	Baie de Pont-Mahé	Zone des Traicts	Baie de Pont-Mahé	Zone des Traicts
de la Vilaine	0,005 ~ 0,03	< 0,005	4 ~ 10	4 ~ 14
de l'étier de Pont d'Arm	0,02 ~ 25	0,06 ~ 36	0,7 ~ 25	0,04 ~ 26

¹² Les concentrations en atrazine mesurées dans l'étier de Pont d'Arm en période de crue, dans le cadre du suivi des étiers, sont inférieures au seuil de détection analytique (20 ng/L).

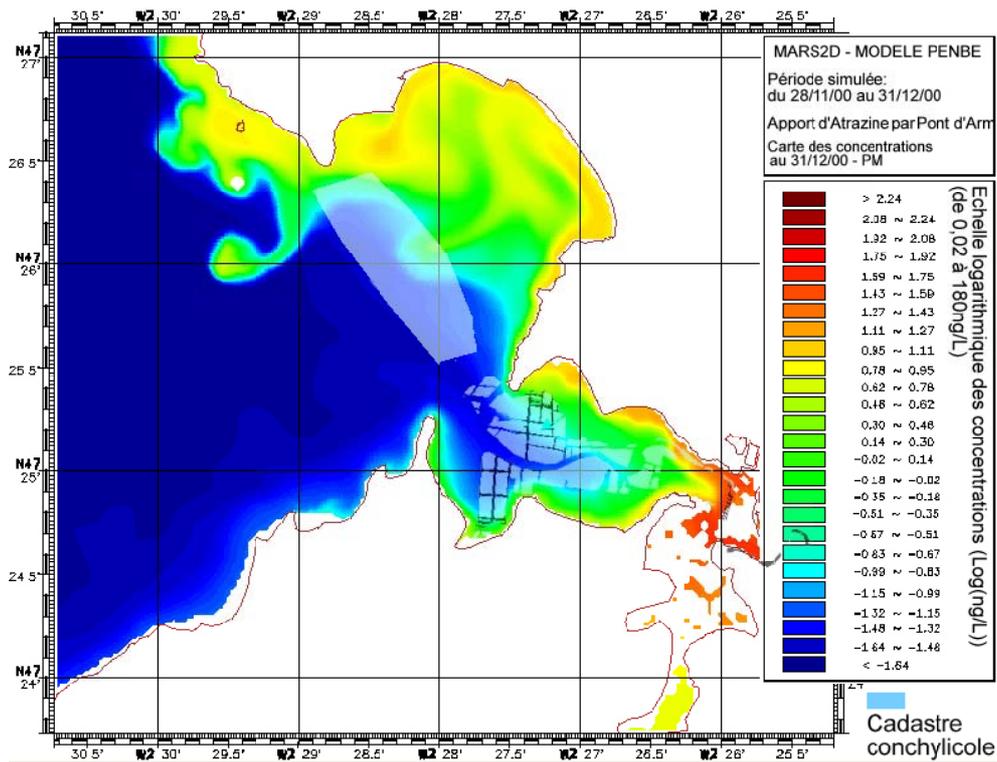


Figure 63. Apport d'atrazine par l'étiér de Pont d'Arm, et concentrations simulées par le logiciel MARS-2D à pleine mer en période de crue – Cadastre conchylicole en surimpression

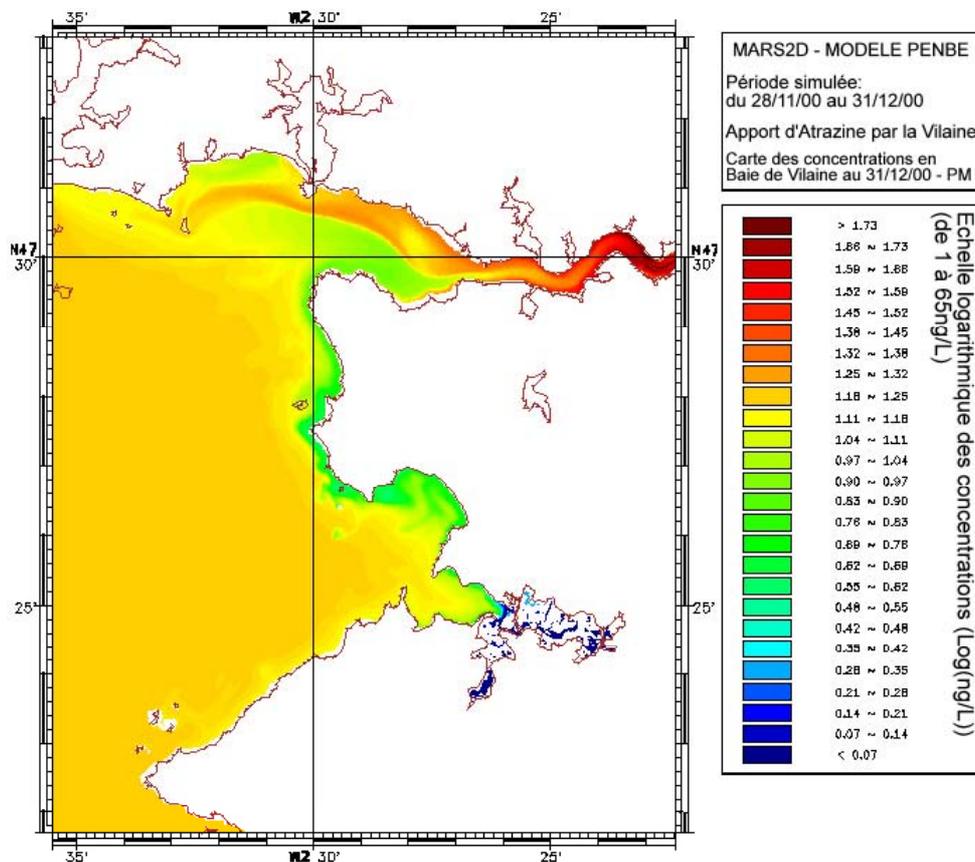


Figure 64. Apport d'atrazine par la Vilaine, et concentrations simulées par le logiciel MARS-2D à pleine mer en période de crue

Le suivi des apports en produits phytosanitaires par les bassins versants et la modélisation de leur dispersion dans les traicts du Croisic et de Pen-Bé s'est trouvé justifié par la détection de nombreuses substances, parfois en concentrations très importantes (cas du Diuron), pouvant avoir des conséquences sur le développement de la vie aquatique et, par suite, économique locale.

Des mesures complémentaires restent à faire pour mieux évaluer un éventuel rôle épuratoire des marais salants dans la préservation de la qualité des eaux des traicts du Croisic et de Pen-Bé. Enfin, la qualité des eaux de ces secteurs peut, sur la base des normes provisoires disponibles et des résultats du suivi (de nombreuses substances ne sont pas recherchées), être qualifiée de bonne. Il est important, cependant, de rester vigilant et de promouvoir autant que possible les bonnes pratiques agricoles et non-agricoles qui permettront de préserver un niveau de qualité environnementale suffisant pour la préservation des usages situés en zone littorale.

5. Evaluation des stocks conchylicoles

5.1. Estimation des stocks de coques et évolution dans le temps

Les surfaces de chaque strate sont très inégales (Fig. 33, chapitre 2.6.3) et peuvent varier selon la nature du sédiment et le type cultural entre 8 ha (strate B) et 52 ha (strate D). Par ailleurs, la répartition géographique des concessions par strate est très éclatée : il n'existe pas de stratégie d'élevage à l'échelle des traicts, celle-ci semble plutôt répondre à l'appréciation de chaque détenteur de parcelle. Le tableau 15 représente les évaluations des stocks et des densités lors des différentes périodes d'échantillonnage (juin et septembre 2001, janvier 2002).

tableau 15. Etat des stocks et des biomasses de coques de juin 2001 à janvier 2002.

Rappel des strates : A sableux, semé. B sableux, non semé. C sablo-vaseux, semé. D sablo-vaseux, non semé.

Strate	Surface (ha)	Stock (t)			Densité (t/ha)		
		Juin	Sept.	Janv.	Juin	Sept.	Janv.
A	38,8	1218	945	976	31,4 ± 13,2	24,4 ± 18,5	25,2 ± 24
B	7,6	62	16	166	8,1 ± 11,6	2,1 ± 1,3	21,8 ± 13,0
C	38,5	623	669	1426	16,2 ± 11,6	17,4 ± 17,7	37,0 ± 37,8
D	51,8	786	577	1091	15,2 ± 6,4	11,1 ± 4,0	21,1 ± 7,1
Total	137	2689	2207	3659	19,7 ± 2,4	16,1 ± 3,2	26,7 ± 5,9

En juin 2001, les densités d'élevage montrent une importante disparité entre les strates étudiées. L'effet cultural (semis : strates A et C, ou absence de semis : strates B et D) ne semble avoir d'effet que sur les concessions sableuses (A et B). Cependant, les résultats laissent apparaître des rendements de croissance dissemblables pour une même stratégie culturale lorsque la nature sédimentaire est différente. Ainsi, pour les parcelles ensemencées, les densités d'élevage sont supérieures en sol sableux. A contrario, les concessions non semées offrent de meilleurs rendements pour un sol sablo-vaseux. Enfin, les surfaces semées représentent à elles seules plus de 68 % du stock en élevage.

En septembre 2001, pour des surfaces de strates identiques à celles du mois de juin, les surfaces semées représentent en biomasse 73 % du stock total. Les densités moyennes d'élevage de la coque dans les traicts semblent avoir diminué sans, toutefois, présenter de différences significatives. La strate A représente, comme en juin, le stock en élevage le plus important alors que la strate B reste la moins exploitée. La strate A, constituée essentiellement de concessions proches de l'ouverture des traicts sur l'océan, est en effet un secteur où l'hydrodynamisme est important (Fig. 6, chapitre 1.3), ce qui va de pair avec une forte teneur des sédiments en sable, propice à l'élevage des coques.

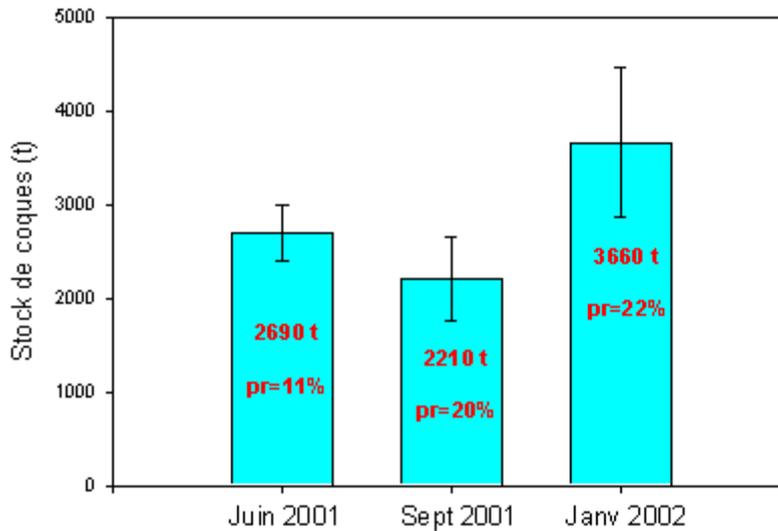


Figure 65. Evolution de la biomasse de coques en élevage.

En janvier 2002, les strates semées représentaient 66 % de la totalité du stock. Les résultats montrent à cette époque une augmentation significative du stock de coques en élevage à l'échelle des traicts du Croisic. Le stock peut varier rapidement dans le temps puisque à ces trois périodes de l'année il était respectivement de 2700, 2200 et 3600 tonnes (Fig. 65).

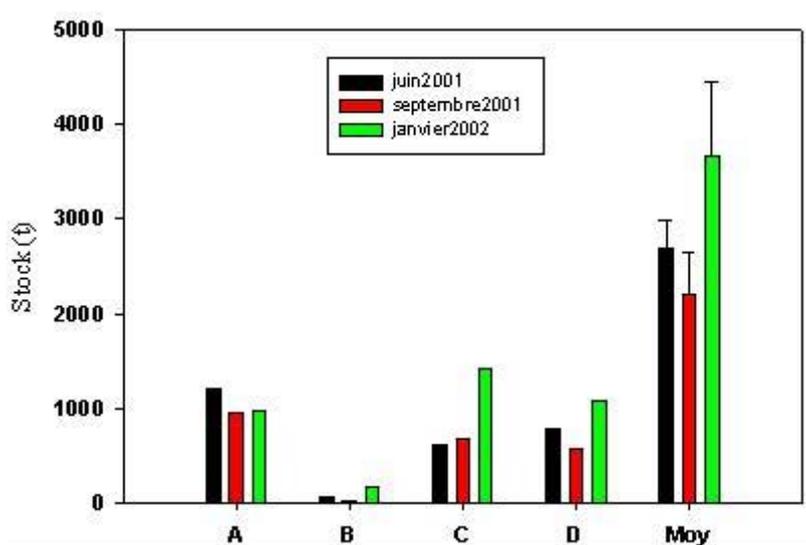


Figure 66. Répartition du stock de coques en fonction des strates au cours des périodes étudiées

L'évolution du stock au cours des périodes d'étude ne représente pas la même répartition selon les différentes strates (Fig. 66). En effet, si le stock moyen augmente significativement en janvier 2002, il n'en est pas de même pour toutes les strates. Ainsi, il apparaît que la strate A ne suit pas l'évolution générale et aurait même tendance à diminuer.

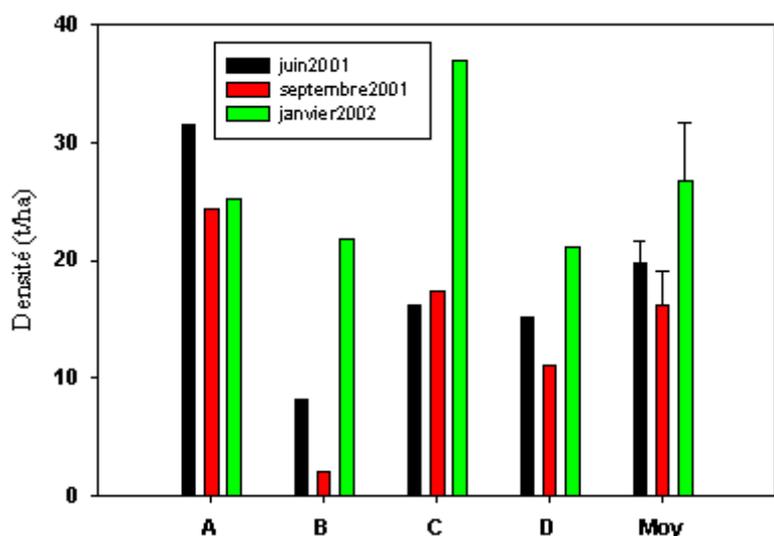


Figure 67. Evolution des densités d'élevage par strate et au cours de l'étude.

Un constat identique peut être fait en observant l'évolution des densités de coques en élevage par strate (Fig. 67). On note une nouvelle fois qu'il existe peu de variabilité sur les densités pondérales d'élevage de la strate A, alors qu'elle est importante sur les trois autres. D'autre part, il est raisonnable de considérer que la répartition spatiale des concessions par strate est hétérogène et qu'ainsi les événements naturels n'ont pas plus d'effets sur la strate A que sur les autres.

Dans ce cas, seule l'activité humaine, notamment de pêche, peut être responsable de ce phénomène en maintenant un stock toujours équivalent malgré les périodes de recrutement local de naissain.

Le nombre de coques élevé au m² n'a cessé d'augmenter de juin 2001 à janvier 2002 (Fig. 68). Le tableau 16 montre dans quelle mesure celui-ci a pu évoluer dans chaque strate.

tableau 16. Répartition du nombre de coques / m² et par strate au cours de l'étude.

Strates	Juin 2001	Septembre 2001	Janvier 2002
A	752	816	720
B	96	144	1360
C	432	1136	1328
D	256	976	1264

Les données du tableau 16 montrent que l'effet du semis est appréciable sur les strates A et C. En revanche, au mois de janvier, la pratique culturale n'a plus d'impact sur les densités de semis entre strates. Cependant, on observe que malgré les différentes périodes supposées de recrutement local en juvéniles, la strate A présente des densités équivalentes de juin 2001 à janvier 2002. Ceci suppose une nouvelle fois que la strate A subit davantage d'interventions humaines de régulation par la pêche ou offre plus de pertes naturelles.

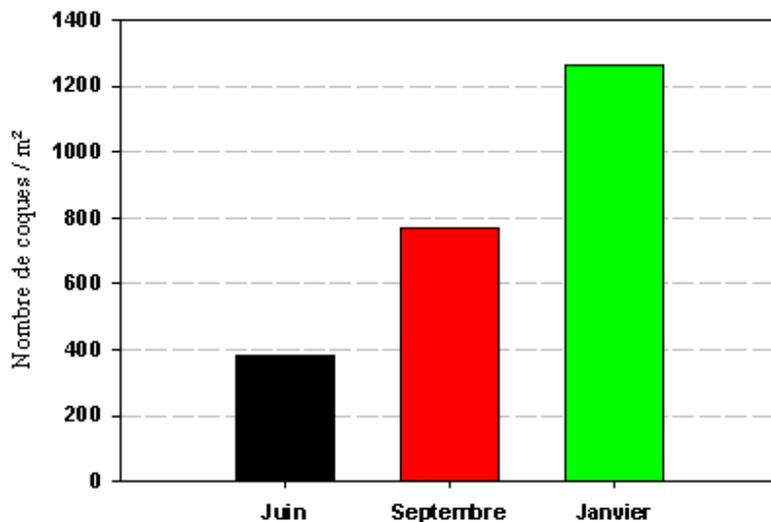


Figure 68. Evolution du nombre de coques élevé au m² au cours de l'étude

La distribution de la population en classe de taille montre une arrivée relativement faible de juvéniles entre juin et septembre, comparée au recrutement local situé entre septembre et janvier (Fig. 68).

Ces résultats peuvent être comparés à l'augmentation du stock qui a été observé à cette même période. Ainsi, l'élévation de la biomasse doit être davantage attribuée à l'arrivée de naissain qu'à la production biologique.

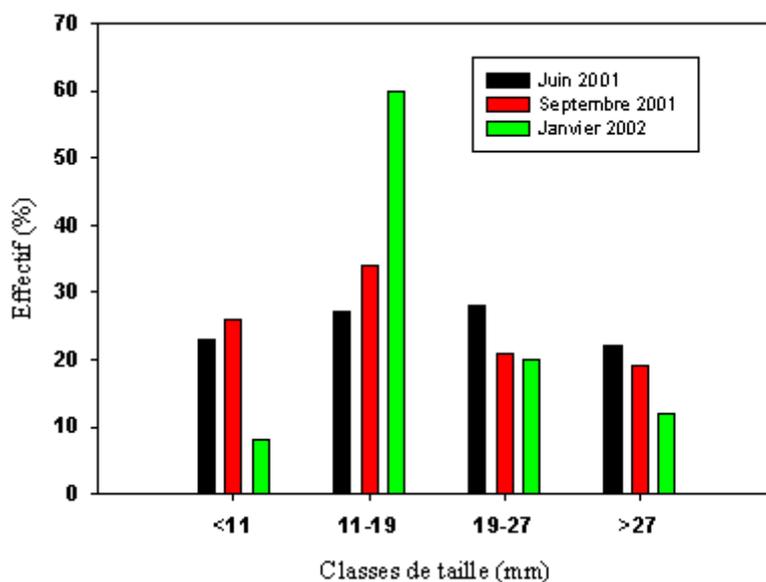


Figure 69. Distribution des tailles de coques en élevage dans le Traict du Croisic .

Les éleveurs peuvent commercialiser les coques à partir d'une taille d'individu supérieure ou égale à 27 mm. Ainsi, la production de coques potentiellement vendable représente au mieux 20 % du stock total en juin 2001 et seulement 12 % en janvier 2002 (Fig. 69).

La stratégie culturelle utilisée par la profession repose soit sur un semis de naissain de coques, en provenance de l'estuaire de la Vilaine, et qui peut s'étaler de l'automne à la fin de l'hiver, soit sur une absence de semis. Dans ce cas, le professionnel ne peut compter que sur un

recrutement local en naissain qui se produit entre mai et octobre selon les saisons.

Les données obtenues étaient, en janvier 2002, de 1200 à 1300 coques / m² soit 20 à 40t/ha. Ces résultats sont très élevés lorsqu'on les compare à ceux obtenus à Marennes Oléron (Sauriau, 1992) et en baie de Saint-Brieuc (Gros et Hamon, 1989) où il a été trouvé respectivement 4,5 et 2,7 t/ha. Dans ces deux derniers exemples, la biomasse de coques représentait essentiellement le stock de gisements naturels et l'écart important entre les résultats se justifie par l'absence d'intervention humaine sur les semis.

Dans cette étude, il est apparu que l'essaimage local pouvait être très important selon la saison (nombre de coques au m² identique en janvier sur les strates semées ou non

semées) et perturbait l'appréciation de la croissance et de la mortalité des individus en élevage. Cependant, la distribution en classe de taille des effectifs en élevage laisse penser que peu d'individus dépassent 30 mm (1 à 2 %). D'autre part, les résidus de coquilles à la surface du sédiment témoignent de pertes non négligeables, dont il est difficile de déterminer l'origine.

Les résultats du suivi dynamique de la mortalité, de la croissance et du recrutement naturel montrent très nettement que sur les parcelles semées, on ne retrouve que 50 % de la population du départ (2 mois après). C'est à cette même période que l'on relève une augmentation significative de la biomasse qui se stabilise très rapidement début juin. Par ailleurs sur la parcelle non semée, on assiste à une augmentation régulière de la densité et de la biomasse à partir de début juin (Fig. 70).

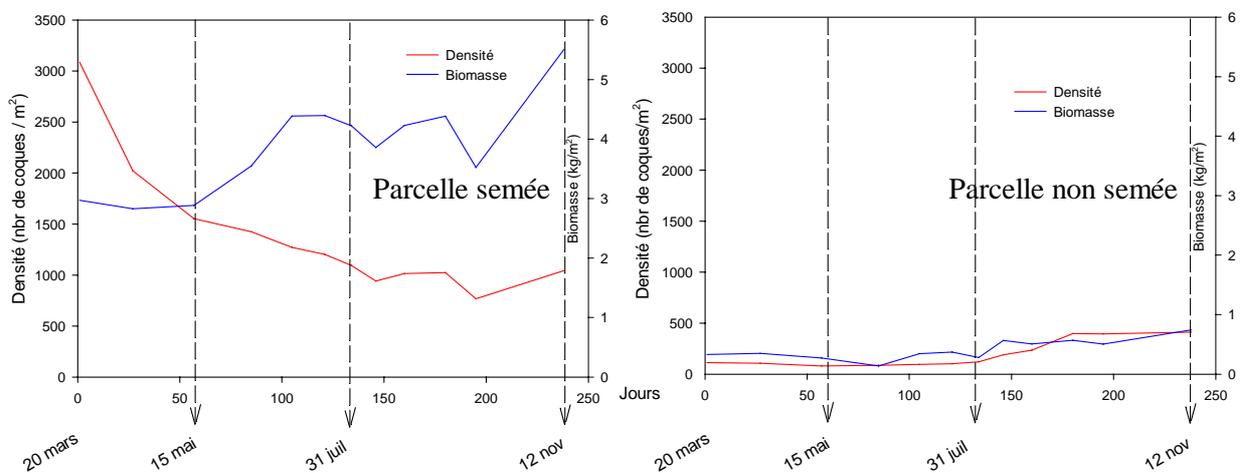


Figure 70. Evolution des biomasses et des densités de coques sur les deux parcelles étudiées.

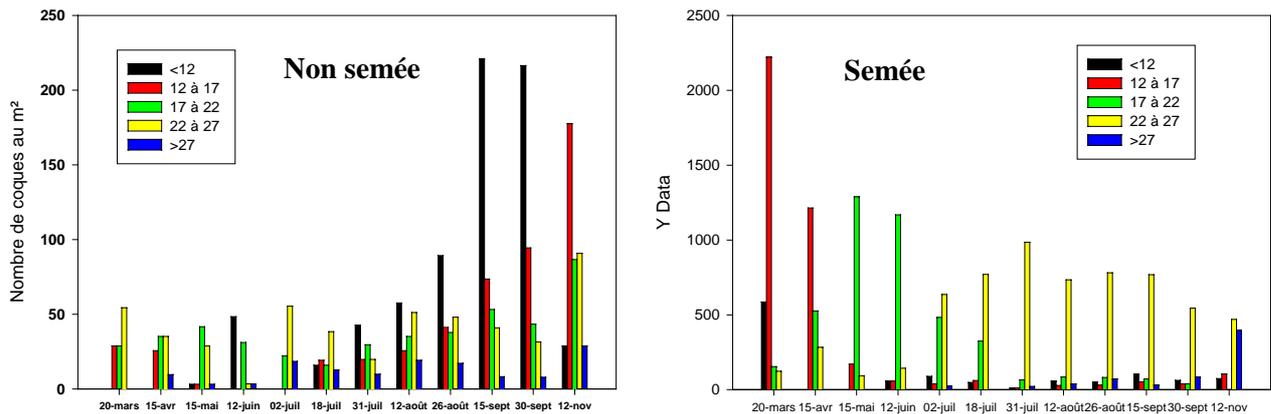


Figure 71. Répartition en classes de taille des coques élevées au cours de l'étude sur les deux parcelles.

L'évolution des classes de tailles permet d'identifier l'apparition de deux pontes au cours de l'étude. Le premier épisode de ponte apparaît la première semaine de juin mais le recrutement en juvéniles se fait connaître de façon massive à partir de fin juillet (Fig. 71). Cependant, il semblerait que le naissain de coques ait plus de difficulté à s'installer sur la

concession semée à forte densité. La parcelle semée présente un déficit en coques de taille supérieure à 27 mm (taille marchande) alors que le mode 22 à 27 mm est largement approvisionné.

5.2. Estimation des stocks d'huîtres dans le traict de Pen-Bé

Pour une superficie concédée d'environ 80 ha, les parcs à huîtres n'occupaient en septembre 2002 que 31,7 ha dédiés à l'élevage en surélevé et en poche (Fig. 72).



Figure 72. Emprise des parcs à huîtres en septembre 2002 et points d'échantillonnage.

Le taux d'occupation, c'est-à-dire la surface occupée par des tables par rapport à la surface exploitée, est de 31%, chiffre comparable à la baie de Bourgneuf (29%).

tableau 17. Résultats de l'estimation des stocks d'huîtres dans le traict de Pen Bé.

	Stock (tonnes)	Linéaire (km)	Densité (kg/m ² occupé)	% longueur
Poches 1 an	299.1	17.5	17.1	17.8
Poches 2 ans	1412.7	62.5	22.6	63.6
Collecteurs 1 an	0	0	0	0
Collecteurs 2 ans	0	0	0	0
Tables vides	0	1803	0	18.6
Captage	0	0	0	0
Total	1711.8	98.3	17.4	100

Contrairement à la baie de Bourgneuf, il n'y a pas de collecteurs dans le traict de Pen-Bé.

La densité de 17,4 kg/m² est nettement plus faible qu'en baie de Bourgneuf où la moyenne est à 22,7 kg/m² (18,7 à 26,1 kg/m²). Le pourcentage relativement élevé de longueur de tables inoccupée s'explique sans doute par la période de cette étude qui coïncidait avec le début des travaux de restructuration du traict.

Les huîtres de 2 ans et plus représentent plus de 82% du stock, estimé à 1700 tonnes (tab.17), donnant ainsi un caractère de « bassin finisseur » à ce site.

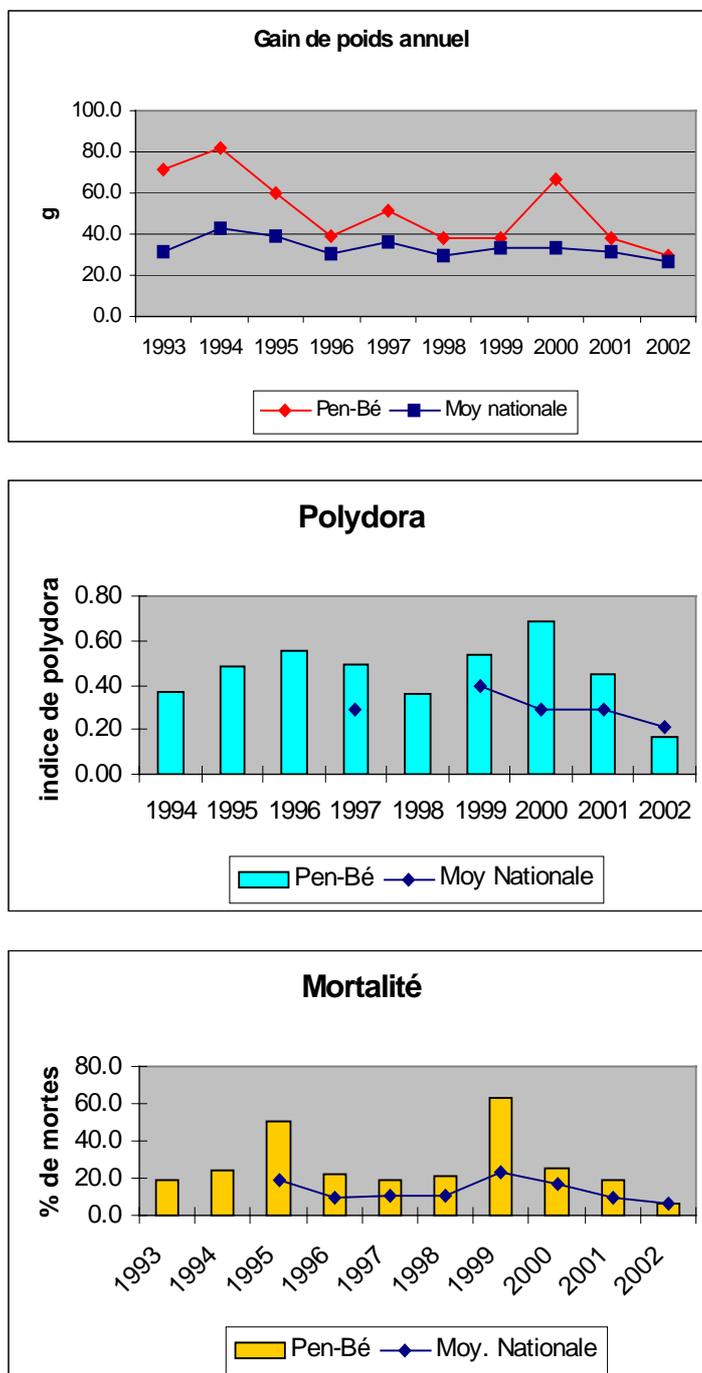


Figure 73. Suivi REMORA de 1993 à 2002 à Pen-Bé.

Ce caractère a également été mis en avant par les résultats du réseau REMORA qui, depuis plus de 10 ans, a montré que le traict de Pen-Bé a de bonnes potentialités de croissance et de qualité de chair des huîtres. Le taux d'infestation par le ver *Polydora* et le pourcentage de

mortalité sont généralement supérieurs à la moyenne nationale mais avec une nette amélioration en 2002 (Fig.73).

5.3. Estimation des stocks de moules dans le traict de Pen-Bé

Sur la superficie totale de 4 ha dédiée à la mytiliculture, les résultats montrent que le stock de moules sur bouchots se situe entre 190 et 290 tonnes soit une moyenne de 244 t \pm 20 %.

tableau 18. Résultats de l'estimation des stocks de moules dans le traict de Pen-Bé en septembre 2004.

	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>	<i>P7</i>	<i>Total</i>
Surface (ha)	0,36	0,81	1,14	0,48	0,56	0,55	3,9
Longueur bouchots (m)	424	1649	1270	1036	903	1079	6361
Nb pieux total estimé	700	2226	1270	1554	858	1403	8010
Nb pieux occupés	635	2172	1268	552	311	1403	6340
Pourcentage de pieux occupés	91%	98%	100%	36%	36%	100%	79%
Poids moy par pieu (kg)	23.8	43.8	36.2	30.6	30.7	43.6	38.5
Biomasse du polygone (t)	15.125	95.187	45.946	16.864	9.541	61.120	243.784

Le nombre total de pieux garnis a été estimé à 6340 pour un poids moyen de 38,5 kg de moules par pieux. Le taux d'occupation global est de 79% (tab. 18).

La distance moyenne entre pieux est de 80 cm, la circonférence moyenne des pieux est de 46,3 cm et l'espacement entre les lignes de bouchots est de 6 à 7 m sauf pour le polygone 1 où elle est de 10 m.

Cette étude a ainsi permis de réaliser pour la première fois le bilan des stocks dans les zones conchylicoles du Croisic et de Pen-Bé, avec en particulier la mise en place d'une méthodologie spécifique pour les coques du Croisic. Ces estimations mériteraient d'être reconduites d'ici 5 à 6 ans, afin de pouvoir valider les choix faits par les professionnels, aussi bien en termes de stratégies culturelles (le Croisic) que de restructuration des secteurs d'élevage (Pen-Bé).

Conclusion et perspectives

L'intérêt de cette étude est d'apporter des éléments permettant de mieux gérer les risques dans les zones conchylicoles, grâce à une meilleure connaissance de l'amont. Son originalité réside dans la construction d'outils dont le couplage permet de mettre en place une démarche intégrée du bassin versant jusqu'à la zone côtière. L'objectif est en effet de préserver la qualité de l'eau, qui est le point commun entre les différentes activités qui cohabitent sur les bassins versants et la zone littorale. Les points essentiels qui se dégagent de ce travail sont les suivants

1 - L'assemblage de très nombreuses données dans un Système d'Information Géographique a débouché sur l'évaluation des risques de pollution à l'échelle du bassin versant et de la parcelle. Ce SIG a été couplé avec le modèle agro-pédologique SWAT®. La restitution cartographique des informations met en évidence les bassins versants qui présentent le plus de risques de contamination par les produits phytosanitaires d'origine urbaine (Le Croisic) ou agricole (sous bassin versant de Belou), les nitrates (cours d'eau du Mès), et les bactéries (Le Croisic, la Croix de l'Anse-Le Requer, La Baule, sud de La Turballe). Des investigations restent à mener sur les apports bactériologiques d'origine agricole, en particulier sur le bassin versant du Mès.

La mise en place d'une Base de Données à CAP Atlantique est en mesure désormais de contribuer à l'alimentation de ce SIG et à la mise à jour des données. La saisie des résultats d'analyses du laboratoire de Biologie Marine de CAP Atlantique depuis 1988, et des données du Service Maritime et de Navigation, doit se terminer en 2006.

L'importation des données créées ou reçues par CAP Atlantique doit permettre pour 2006 de dégager des tendances et les références du milieu avec un recul de plus de 10 ans. Le traitement des données depuis 1992 permettra également d'optimiser la stratégie d'échantillonnage actuelle développée par le laboratoire de CAP Atlantique dans les traicts et les étiers.

Le partage de la base de données en interne à CAP Atlantique est en cours. Les informations recueillies sont en effet précieuses pour le service assainissement de CAP Atlantique concernant l'orientation des contrôles de branchements, ainsi que pour la hiérarchisation de la mise en œuvre des travaux qui contribueront à améliorer la qualité du milieu.

Le partage de ces informations avec les professionnels de la mer, ainsi que d'autres partenaires, est en cours de réflexion. CAP Atlantique a ouvert le 15 avril 2005 un site internet : www.cap-atlantique.fr qui pourrait à terme mettre à disposition des synthèses cartographiques sur les bilans de qualité des eaux et des milieux aquatiques. La consultation de données brutes ou graphiques via internet sera envisagée ultérieurement.

2 - Le recensement des activités existantes sur les bassins versants a conduit à mettre en œuvre un protocole de suivi destiné à évaluer les flux véhiculés par les étiers jusqu'aux traicts. Lorsque c'était possible, les points de suivi retenus ont contribué à valider les résultats issus du couplage SIG/modèle SWAT®. Grâce à ce suivi, les caractéristiques

physico-chimiques des étiers sont mieux connues, notamment en termes de débits, pour lesquels les données étaient quasiment inexistantes jusqu'alors.

Les résultats obtenus pendant l'étude révèlent en particulier que les concentrations en nutriments restent à des niveaux très faibles, en général de l'ordre de 5 mg/L pour les nitrates. Pour l'ensemble des paramètres mesurés, les étiers présentant les plus fortes concentrations ne sont pas forcément les plus pénalisants dès lors que leurs débits sont faibles. Le rejet d'un étier dans un secteur mal renouvelé peut néanmoins se traduire par un risque de contamination dans les traicts.

Pour la première fois, les apports en phytosanitaires ont été évalués. Au total, 31 molécules ont été détectées au cours du suivi, le nombre maximal de substances étant observé d'avril à juillet 2004. Le diuron, dont l'utilisation provient essentiellement des pratiques non agricoles, est présent dans 90% des prélèvements. Cette molécule, qui fait partie de la liste des substances prioritaires établie par la Directive Cadre sur l'Eau, atteint occasionnellement des concentrations qui dépassent largement celles qui sont enregistrées en Pays de la Loire en 2002 et 2003 sur l'ensemble des milieux aquatiques.

3 - L'élaboration de deux modèles hydrodynamiques a grandement contribué à affiner les connaissances dans les secteurs étudiés.

⇒ Les caractéristiques hydrodynamiques des traicts du Croisic et de Pen-Bé ont été précisées en fonction de différentes conditions de vent et de marée. Les apports d'eau douce par les étiers sont quantifiés et très faibles : 0,1% des volumes au Croisic et 2% à Pen-Bé où l'étier de Pont d'Arm représente l'essentiel des apports. Le choix de cet unique point de prélèvement a donc été validé par la modélisation. Une intense circulation a été mise en évidence à l'entrée des traicts, tandis que les courants résiduels sont très faibles voire inexistantes au fond.

Compte tenu du mélange avec les eaux du large au jusant, le renouvellement des eaux des traicts n'est que partiel ; la morphologie du traict de Pen-Bé lui assure un meilleur renouvellement qu'au Croisic.

⇒ La dispersion des polluants est reproduite de façon satisfaisante par MARS 2D, et leur devenir a été étudié pour différentes conditions hydrologiques et météorologiques.

Pour les bactéries, on obtient une bonne adéquation entre les résultats de la modélisation et les mesures du réseau REMI dans le traict de Pen-Bé, ce qui conforte aussi le choix du point de Pont d'Arm. Dans les traicts du Croisic en revanche, le modèle reproduit bien les écarts de contamination observés par le REMI dans les différents secteurs, mais sous-estime les niveaux réels de contamination. Pour les phytosanitaires, la dispersion dans le traict de Pen-Bé conduit à des niveaux de contamination satisfaisants en regard des Normes de Qualité Environnementale provisoires. La même conclusion est valable pour Le Croisic où néanmoins, en période de crue, le diuron pourrait occasionnellement dépasser la NQE provisoire dans la zone du petit traict.

⇒ La part respective des apports de la Loire et de la Vilaine dans les traicts a été estimée. Dans les deux cas, la qualité des eaux à l'intérieur des traicts est gouvernée par celle des étiers tandis qu'elle est davantage influencée par la Loire et la Vilaine à la sortie des traicts.

A Pen-Bé, les périodes de vives-eaux favorisent le transfert de polluants entre l'estuaire de la Vilaine et le traict ; pour les polluants conservatifs (diuron, atrazine,...), les apports de la

Vilaine sont comparables à ceux de l'étier de Pont d'Arm en période de crue, tandis qu'ils sont négligeables en étiage.

A la demande du Conseil Scientifique et Technologique de ce programme, nous avons tenté d'estimer la part respective des apports de la Loire et des étiers dans les traicts du Croisic. Une simulation réalisée sur le mois d'avril 2004 a montré qu'à cette époque, les eaux de la Loire contribuaient pour 75 à 90% à la dessalure observée dans les traicts. Néanmoins, lorsque la concentration en polluants est élevée dans les étiers, ceux-ci ont une influence prépondérante sur la qualité des eaux des traicts. Ce résultat préliminaire devra être affiné ultérieurement en particulier en utilisant un modèle 3D plus sophistiqué qui permet de prendre en compte les phénomènes de stratification rencontrés dans l'estuaire.

4 – L'évaluation des stocks en élevage a été réalisée pour la première fois dans les deux secteurs.

A Pen-Bé, les stocks d'huîtres et de moules représentent respectivement 1700 tonnes et 240 tonnes. Ces chiffres pourront servir de point de comparaison avec les évaluations qui seront réalisées ultérieurement.

Les différentes études réalisées par la station Ifremer de Bouin sur l'élevage de la coque dans les traicts du Croisic ont montré la variabilité du stock en élevage au cours de l'année (2200 à 3500 tonnes). Cette variabilité s'explique en partie par le recrutement local en juvéniles qui vient perturber les biomasses en élevage. D'autre part, il semble que le pourcentage d'animaux atteignant la taille marchande (27 mm) en fin d'élevage soit faible : ce constat pourrait s'expliquer par le captage de naissain naturel de coques, qui se traduit par une arrivée massive de jeunes coques, entraînant une surdensité qui, par effet mécanique, aboutit à l'expulsion des animaux les plus gros. Vraisemblablement, la nature du sédiment (sableuse ou sablo-vaseuse) pourrait avoir une incidence sur la capacité à accueillir plus ou moins d'individus. Il ressort de ces travaux l'intérêt pour les professionnels de définir des méthodes culturales (en matière de semis) propre à chaque secteur en fonction de l'hydrodynamisme, de la nature du sédiment, de la richesse de la colonne d'eau et de l'importance de recrutement en naissain propres à chaque zone d'élevage des traicts du Croisic.

La synthèse des données acquises pendant l'étude conduit aux propositions et recommandations suivantes :

- les mesures de débit, assez simples à réaliser, sont longues et coûteuses. Bien qu'il soit nécessaire d'acquérir quelques données complémentaires, il n'est pas utile de poursuivre les prélèvements mensuels. Dans la mesure où l'on s'intéresse aux épisodes susceptibles de provoquer des risques de contamination dans les traicts, deux campagnes de suivi pendant une semaine, déclenchées à la suite d'un épisode pluvieux (> 10 mm en 24 heures) sur les étiers à plus fort débit (Lanclay, Plinet, Pont d'Arm) permettraient d'approcher au mieux les apports maximum, qui seraient alors utilisés comme condition la plus pénalisante dans le modèle MARS 2D.
- les analyses mensuelles de nutriments dans les traicts et les étiers pourraient être optimisées en suivant préférentiellement les exutoires des bassins versants à risque définis par Lomakine (2005), ainsi que les étiers de Lanclay et Plinet. Seules les périodes d'épandage seraient ciblées, avec dans un premier temps un

échantillonnage bimensuel, voire hebdomadaire. Lorsque CAP Atlantique aura réalisé le traitement de qualité des eaux acquises dans les étiers et les traicts depuis 1992, il sera aussi possible de proposer, si nécessaire, une stratégie adaptée au suivi des nutriments pendant la période estivale, qui est la période la plus critique vis-à-vis d'un risque potentiel d'eutrophisation.

- le modèle SWAT® prévoit dans certains cas, au débouché des étiers, des concentrations supérieures à celles qui sont observées grâce aux mesures de terrain, ce qui laisse supposer une rétention des polluants par les sédiments des étiers et des marais salants, sur lesquels CAP Atlantique envisage de mener une réflexion. En effet, ces vases peuvent être remises en suspension lors de travaux ou placées près de zones de production de sel pour conforter des talus. L'innocuité de ces matériaux devrait être vérifiée avant utilisation, et les analyses devront porter en priorité sur les substances définies par la DCE comme susceptibles de présenter un risque pour l'environnement.
- sur le plan de la qualité bactériologique dans le traict du Croisic, la fréquence mensuelle de l'échantillonnage et la non prise en compte de plusieurs rejets pourraient être à l'origine des différences observées. Grâce aux données recueillies par CAP Atlantique, il sera possible d'affiner cet aspect, en intégrant notamment les données sur les rejets pluviaux et le centre hélio-marin.
- au vu des résultats obtenus, la mise en place d'un suivi mensuel des phytosanitaires semble superflue, d'autant que leur analyse est coûteuse. En couplant les résultats de l'étude CREPEPP (à paraître) sur les phytosanitaires utilisés en agriculture avec les données du SIG sur l'occupation des sols, il sera possible de mieux cibler les périodes d'échantillonnage pour évaluer la présence ou non de ces substances dans les étiers. Deux ou trois séries d'analyses en période de risque (pluie après épandage) complèteraient avantageusement les données acquises au cours de cette étude. Dans la mesure où les apports sont essentiellement d'origine urbaine au Croisic (utilisation par les particuliers difficile à cibler sur les plans qualitatif et quantitatif), la sensibilisation des usagers semble dans l'immédiat la méthode la plus efficace. C'est le sens de l'opération « jardinez sans pesticides » organisée par CAP Atlantique du 30 mai au 4 juin 2005 dans le cadre de la semaine du développement durable. Par ailleurs, le 30 mai 2005, les quinze communes de CAP Atlantique et la Communauté d'Agglomération ont signé une charte par laquelle elles s'engagent à entretenir les espaces publics sans polluer. L'objectif affiché est de reconquérir la qualité des eaux vis-à-vis des pesticides ; il se traduit dès à présent par la mise en place de plans de désherbage communaux à l'échelle de toute la Communauté d'Agglomération, qui peuvent être considérés comme un résultat très concret de cette étude.
- le couplage du modèle hydrologique SWAT® avec le modèle hydrodynamique MARS-2D développé par Ifremer dans les traicts semble une perspective intéressante pour prévoir le devenir des bactéries, des nutriments ou des produits phytosanitaires dans le milieu. Sur le plan technique, un couplage semi-automatique peut être rapidement mis en place. Les deux modèles seraient toujours lancés séparément, mais un programme permettrait la transcription rapide des informations générées par SWAT® vers MARS pour démarrer aussitôt la simulation hydrodynamique. Une extension SIG développée par Ifremer permet d'exploiter les résultats de MARS-2D avec le logiciel ArcView. Ils peuvent ainsi être intégrés aux résultats du modèle hydrologique. L'intérêt d'un tel couplage réside dans la possibilité

d'élaborer des scénarios destinés à prévoir les effets de l'augmentation ou de la diminution de la contamination sur les bassins versants et dans les traicts. Quelques simulations ont été effectuées avec des apports bactériologiques massifs associés à une forte pluviométrie ; elles montrent la faisabilité de ce couplage et devront être complétées par des simulations mettant en jeu d'autres types de contaminants et différentes situations hydrologiques et météorologiques.

- il manque incontestablement un volet économique dans cette étude, et l'une des perspectives pourrait être l'évaluation des coûts liés aux conséquences d'une dégradation de la qualité des eaux. Ces coûts (contraintes de commercialisation, intensification de la surveillance,...) seraient alors comparés à ceux de la surveillance existante, ce qui donnerait aux gestionnaires des éléments utiles pour établir leurs choix de développement et d'aménagement.
- l'évaluation des stocks de coquillages, liée à un relevé bathymétrique précis (LIDAR) devraient permettre d'estimer ultérieurement l'impact de la restructuration des traicts, entreprise en 2002, sur la sédimentation et les quantités de coquillages produites, en relation avec le suivi REMORA mis en place par l'Ifremer. Une périodicité de 5 ans semble pertinente pour réaliser ce type d'action.

Par ailleurs, les outils mis au point et les connaissances acquises au cours de ce programme pourraient être utilisés pour élaborer un modèle dynamique de l'élevage de la coque au Croisic en se basant sur l'identification de zones homogènes (hydrodynamisme, nature du sédiment, influence du bassin versant) qui pourraient être caractérisées par leur capacité trophique propre (qualité et quantité de nourriture, croissance et survie des populations, captage de naissain). Ce modèle pourrait constituer un outil d'aide à la profession pour la gestion des élevages.

L'un des objectifs de cette étude était d'élaborer une méthodologie permettant de comprendre le fonctionnement des traicts du Croisic et de Pen-Bé, et de pouvoir la transposer à d'autres secteurs conchylicoles. A l'issue de ce travail, nous disposons effectivement de nouveaux outils qui permettent d'intégrer les connaissances acquises depuis les bassins versants jusqu'aux traicts et de fournir une information utilisable par les gestionnaires pour optimiser l'utilisation de l'espace et la cohabitation des diverses activités socio-économiques. Il est dorénavant possible d'évaluer les risques de contamination en provenance des bassins versants, et de prévoir le devenir des substances polluantes dans les traicts, ce qui peut déboucher sur des actions correctrices destinées à améliorer la qualité des eaux pour garantir la pérennité de l'ensemble des usages.

A très court terme, on peut envisager de compléter les actions déjà entreprises (en rouge sur la figure 74) par un modèle biologique (en vert), qui permettrait le couplage entre les données acquises et les évaluations de stocks, afin de contribuer à optimiser la gestion des zones conchylicoles.

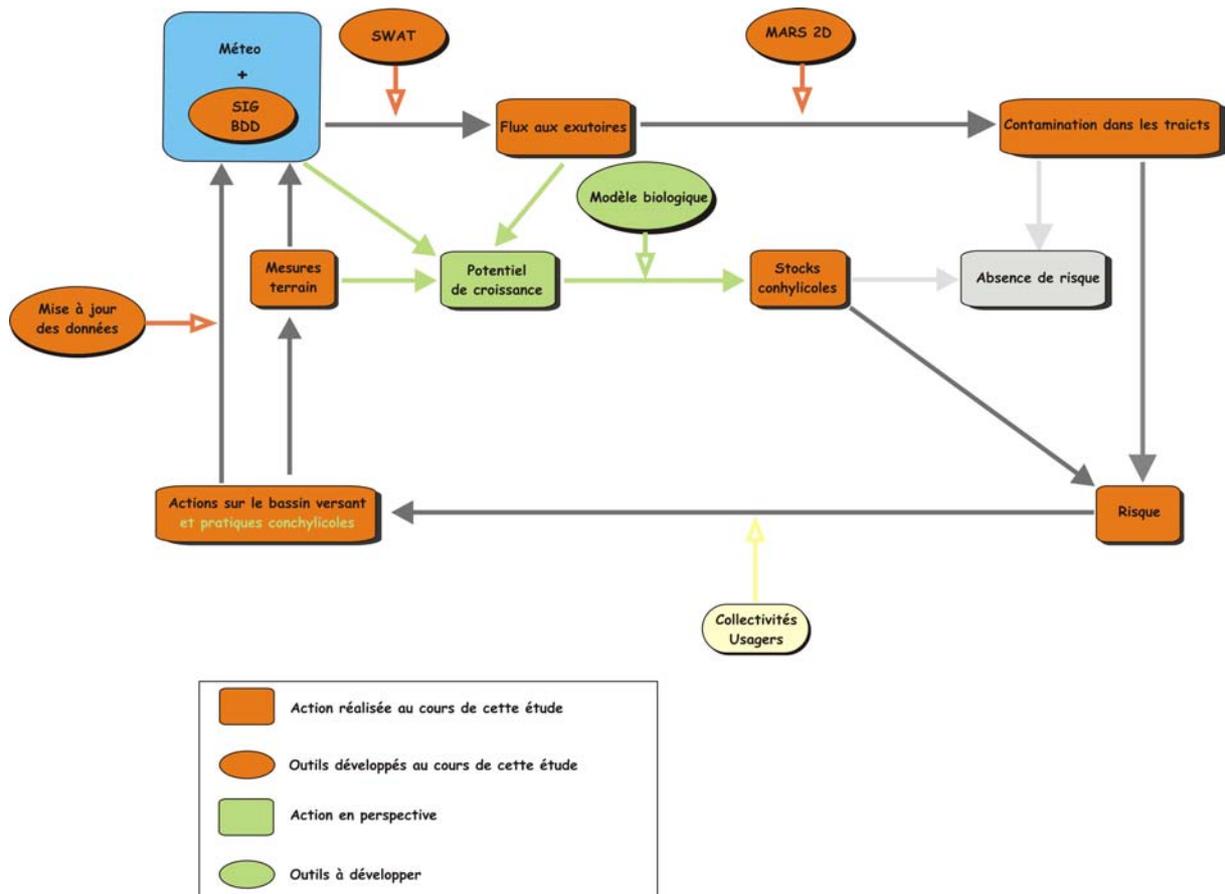


Figure 74. Bilan des actions réalisées au cours de l'étude, et développements nécessaires.

D'ores et déjà ce travail est programmé pour constituer l'un des maillons d'une étude pluridisciplinaire sur la baie de Bourgneuf, pilotée par le laboratoire Géolittomer et associant l'ensemble des partenaires du Pôle Mer et Littoral de l'Université de Nantes (biologistes, géographes, sédimentologues, sociologues, économistes) et l'Ifremer. Cette étude implique également des acteurs locaux : la Section Régionale Conchylicole des Pays de la Loire, le SMIDAP et le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux des bassins versants de la baie de Bourgneuf et du marais breton. Son objectif est de mettre en place et de valider une méthodologie basée sur le couplage de modèles (agrohydrologique, hydrodynamique, production conchylicole, bioéconomique) à l'échelle de tout le territoire étudié, depuis les bassins versants jusqu'à la zone littorale, afin de favoriser l'émergence d'une véritable politique de gestion intégrée des zones côtières.

Bibliographie

AFNOR, 2002. Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts. Méthode d'exploration du champ des vitesses. Norme NF EN ISO 748, 44 p.

Aminot A., Kérouel R., 2004. Hydrologie des écosystèmes marins : paramètres et analyses. Editions Ifremer, 336p.

Auby I. et Maurer D. 2004. Etude la reproduction de l'huître creuse dans le bassin d'Arcachon. Rapport Ifremer, R. INT.DEL/AR 04-05, 203 p + annexes.

Aurousseau P., Gascuel-Oudoux C., Squidant H., 1998. Eléments pour une méthode d'évaluation d'un risque parcellaire de contamination des eaux superficielles par les pesticides. Etude et gestion des sols, vol.5, n°3, INRA, ENSAR, Olivet, pp. 143-156.

Bacher C., J-P. Baud, A. Bodoy, J-M. Deslou-Paoli, J-P. Dreno, M. Heral, D. Maurer, J. Prou, 1986. A methodology for the stocks assesments of cultivated oysters along the french Atlantic coasts. CIEM, CM 1986/K: 36, 14 p.

Baud J-P., J. Haure, 1987. Estimation des stocks d'huîtres cultivées dans la baie de Bourgneuf en 1986. Rapport IFREMER DRV 87-020/RA/Bouin, 32 p.

Baud J-P., J. Haure, 1989. Estimation des stocks d'huîtres cultivées (*C. gigas*) et de moules de gisements naturels (*M. edulis*) dans la baie de Bourgneuf en 1987. Rapport IFREMER DRV 89-40/RA/Bouin, 51 p.

Baud J-P., J. Lefrançois, J. Haure, 1990. Evaluation des stocks d'huîtres (*Crassostrea gigas*) et des stocks de moules (*Mytilus edulis*) sur les gisements naturels et en élevage sur bouchots dans la baie de Bourgneuf (année 1988). Rapport IFREMER DRV 90-35/RA/Bouin, 65 p.

Baud J-P., P. Hommebon, 1987. Estimation des stocks d'huîtres creuses en élevage dans la baie de Bourgneuf en octobre 1985. Rapport IFREMER DRV 87-002-RA/Bouin, 28 p.

Bauer B., 2004. Création d'un outil de gestion des données pour le suivi de la qualité du milieu littoral. Rapport de stage ISA Lille – CAP Atlantique, 65 p. + annexes.

Bertignac, M., Auby, I., Foucard, J., Martin, S., De Montaudoin, X., Sauriau, P.G., 2001. Evaluation du stock de palourdes du bassin d'Arcachon, rapport IFREMER DRV/RH/RST/2001/05, 35p.

Bioteau T., Bordenave P., Laurent F., Ruelland D., 2002. Risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole à l'échelle de bassins versants : intérêts d'une approche par modélisation avec SWAT®. *Ingénieries* n° 32, p. 3-12.

Bolo P., Brachet C., 2001. SIG et gestion des pollutions agricoles diffuses. *Gestion spatiales des risques*, Information Géographique et Aménagement du territoire, Hermes, pp. 97_113.

Bonnel, B., 1986. Contribution à l'élevage de la coque *Cerastodrema edule* dans le Traict du Croisic juillet 1984-Novembre 1985, Contrat d'étude de la chambre de commerce et d'industrie de Saint-Nazaire, IFREMER, SRC Bretagne-Sud, 89p.

Bonnot-Courtois, C., Rollet C., Fournier J., Populus J., Guillaumont B., Loarer, R., 2005. Cartographie bio-morpho-sédimentaire des estrans dans le cadre du réseau benthique.

Complémentarité des orthophotographies littorales et des données Lidar. Photointerprétation n° 2005/2, Volume 41, pp 13-27 + illustrations pp35-39.

Buchet, 2003. Conception d'outils pour le suivi de la qualité du milieu dans les secteurs conchylicoles des Traicts du Croisic et de Pen Bé. Rapport de stage DESS Université de Perpignan – Ifremer – CAP Atlantique, 57 p + annexes.

Chambre d'Agriculture, 2003. Données sur l'Agriculture. CAP Atlantique, 2003.

CAP Atlantique, 2003. Pré-diagnostic Environnement et Activités primaires. Rapport CAP Atlantique, 70p.

Camus, P. et Dumas, F., 2003. Etude de la dispersion de rejets urbains par modélisation numérique. Cas des rivières de Vannes et Noyal - Golfe du Morbihan. Direction de l'eau et de l'assainissement de la Ville de Vannes. 17 p.

Cellule Régionale d'Etude des Pollutions des Eaux par les Produits Phytosanitaires des Pays de la Loire (CREPEPP), 2003. Suivi des pesticides dans les rivières de la Région des Pays de la Loire. Présentation devant le comité plénier de la CREPEPP du 29 septembre 2003.

Chambard V., 2004. Protection des eaux souterraines contre la pollution par les pesticides ; Dispositifs institutionnels et réglementaires en Europe – Synthèse technique – ENGREF – 17 pages.

Chambre de Commerce et d'Industrie, 2003. Etude diagnostic du territoire de la Communauté d'Agglomération CAP Atlantique. Rapport CAP Atlantique, 8 p.

Chantereau S., Chiffolleau J-F., Dufour A. et Jeanneret H., 2002. Utilisation des données du RNO dans le cadre du naufrage de l'Erika. In RNO 2002. – Surveillance du milieu marin. Travaux du RNO. Edition 2002. Ifremer et Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, p. 25-44.

Chiffolleau J.F, Auger D., Chartier E., Grouhel A., 2003. Dosage de certains métaux traces (Ag, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, V, Zn) dans les organismes marins par absorption atomique. Editions Ifremer, 45p.

Chiffolleau J.F., Auger D ; Chartier E., 2002. Dosage de certains métaux traces dissous dans l'eau de mer par absorption atomique après extraction liquide liquide, 39p. Editions Ifremer, 39p.

Comité d'Expansion Economique de la Loire-Atlantique, 2003. CAP Atlantique : Etat des lieux socio-économique. Rapport CAP Atlantique, 38 p.

Cossa D., Coquery M., Nakhlé K., Claisse D., 2002. Dosage du mercure total et du monométhylmercure dans les organismes et les sédiments marins. Editions Ifremer, 28p.

CREPEPP (2003) : Documents de travail du Comité plénier.

Di Luzio M., Srinivasan R., Arnold J.G., Neitsch S.L., 2002. Arcview interface for SWAT® 2000, user's guide.

Eau et Rivières de Bretagne (2000) : La contamination des eaux bretonnes par les pesticides <http://assoc.wanadoo.fr/erb/actu21.htm>

Fleury, P.-G., Langlade, A., Le Coguic, M.-J., Thebault, A., Chellet, B., Ponthoreau, C., Devulder, G., 1999. Suivi des coques du Croisic en 1998 ; bilan synthétique, IFREMER ;

SICAPG ; Université de Nantes faculté des Sciences et Techniques, *RIDRV-99-04/RA/LCB*. 15p.

Glize, Ph., Ponthoreau, C., 1997. Optimisation du captage naturel de la coque (*Cerastoderma edule*) dans le Traict du Croisic, SMIDAP et Laboratoire de biologie marine de Pen Avel, 47p.

Grangeré K., 2004. Simulation de l'influence des bassins versants sur les concessions ostréicoles de la baie des Veys (baie de Seine occidentale). Mémoire de DEA « modélisation de l'environnement marin », Ifremer / Université de Liège, 45p.

Gros, P., Hamon, D., 1989. Estimation de la biomasse des bivalves intertidaux (moule, coque) exploités en baie de Saint-Brieux (Manche-Ouest), *IFREMER DERO-EL/89-25*, 173p.

Haure J., H. Palvadeau, M. Nourry, C. Pénisson, M. Papin, B. Dupuy et J.L. Y. Martin, 2002. Etude des stocks de coquillages fouisseurs (*Cerastoderma edule*) du Traict du Croisic. Optimisation de la stratégie d'échantillonnage. Contrat Région Pays de Loire n° 00-5034-0 ; 24p.

Haure, J., Baud, J.P., 1995. Approche de la capacité trophique dans un bassin ostréicole (baie de Bourgneuf). *RIDRV-95-16/RA-Bouin*. 104p.

Héral, M., Deslous-Paoli, J.M., Prou, J., 1988. Approche de la capacité trophique d'un écosystème conchylicole. *Cons. Int. Explor. Mer*, CM 1988/K22.

Ifen, 2004. Les pesticides dans les eaux – 6ème bilan annuel – Données 2002 – Etudes et travaux n°42 – 34 pages

Ifen, 2003. Les pesticides dans les eaux – 5ème bilan annuel – Données 2001 – Etudes et travaux n°37 – 29 pages

Ifen, 2002. Les pesticides dans les eaux – Bilan annuel 2002 – Etudes et travaux n°36 – 25 pages

Ifen, 2000. Les pesticides dans les eaux – Bilan 1997-1998 – 16 pages

Ifremer, 2002. Les normes de qualité environnementale dans la Directive Cadre sur l'Eau. Commentaires pour le milieu marin. Cellule mixte Ifremer/ Ineris ARC, 39 p.

INSEE, 2001. Radiographie de la Communauté d'Agglomération CAP Atlantique. Rapport CAP Atlantique, 5 p.

Jeanneau S., 1997. Dynamique des sels nutritifs, des métaux en traces et des bactéries hétérotrophes dans le système salicole de Guérande – Thèse de Doctorat – Discipline : Sciences de la Terre ; Spécialité : Biogéologie et microbiogéologie – Université de Nantes – Faculté des Sciences et des Techniques – 211 p. + annexes

Jeanneret H., Durieux F., Gendronneau M., Haure J., Le Merrer Y., Lomakine C., Martin J-L., Papin M., Ponthoreau C., 2004. Etude des secteurs conchylicoles du Croisic et de Pen-Bé. Contrat de plan Région Pays de la Loire/Ifremer. Rapport Intermédiaire, 50 pages.

Journal Officiel des Communautés Européennes, 2000. Directive 2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, 72 p.

Journal Officiel des Communautés Européennes, 2001. Décision n° 2455/2001/CE du parlement européen et du conseil du 21 novembre 2001 établissant la liste des substances prioritaires dans le domaine de l'eau et modifiant la directive 2000/60/CE, 5 p.

Laurent, F. , 1996. Outils de modélisation spatiale pour la gestion intégrée des ressources en eau. Application aux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Saint-Etienne et de l'Ecole Nationale Supérieure de Mines de Paris, 357 p.

Le Bec, C. et Le Mao, P., 2002. Simulation numérique des apports du Gouët en baie de Saint-Brieuc. Rapport Ifremer DEL/SM, 15 p. + annexes.

Le Goff, R. et Riou, Ph., 2002. Suivi et qualité du milieu marin ; élaboration d'aides à la prise de décision en matière d'aménagement et de gestion de l'environnement littoral en Basse-Normandie – rapport annuel 2001. RST DEL/02-05/Port-en-Bessin, 20 p. + annexes.

Le Hir P., Guillaud J.F., Bassoullet Ph., L'Yavanc J.,1991. Application d'un modèle sédimentaire au devenir des contaminants particuliers – La mer et les rejets urbains. Bendor. IFREMER. Actes de Colloques 11 ; pp 205 à 220.

Le Moine O., P. Geairon, D. Razet, 2002. Elaboration d'une technique d'évaluation rapide des stocks Conchylicoles. Contrat OP Marennes-Oleron, DRV/RA/LCPC, 21 p.

Lees D. N., Nicholson M., Tree J.A., 1995. The relationship between levels of *E. Coli* in shellfish and in seawater with reference to legislative standards. *International Conference on Molluscan Shellfish Safety*, november 1994, Sidney, Australia.

Lefrançois, J., 1988. Estimation des stocks de moules (*Mytilus edulis* L.) de gisements naturels et de culture sur bouchots dans la baie de Bourgneuf (année 1988) - Rapport de stage (DESS), Ifremer Bouin. 90 p.

Lomakine, C., 2001. Problématique et méthodologie de la mise en place d'un SIG sur le bassin versant des traicts du Croisic. Mémoire de DEA, Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes, 98 p.

Lomakine, C., 2005. Contribution des bassins versants aux pollutions des écosystèmes conchylicoles du Croisic et de Pen-Bé. Approche par couplage d'un SIG avec un modèle agro-hydrologique. Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 284p.

Marchand M., Tissier C., Tixier C. & Tronczynski J. (2004) : Les contaminants chimiques dans la Directive Cadre sur l'Eau – Département "Polluants Chimiques" – Centre Ifremer de Nantes – 31 pages.

Maurer, D., 1989. Approche des relations entre la croissance de l'huître *Crassostrea gigas* et le milieu dans le bassin d'Arcachon. *RIDRV-89-34/RA-Arcachon*. 33p.

Mazoyer V.,1998. Classification des risques phytosanitaires pour la conchyliculture du littoral charentais. Mémoire E.S.I.P.T.A., IFREMER – INRA, 48 p + annexes.

Morin, 2002. Le bassin des traicts du Croisic : inventaire des apports polluants et proposition d'un suivi de la qualité des eaux. Rapport de stage Maîtrise Université de Perpignan – Ifremer – CAP Atlantique, 56 p + annexes.

Mortreux, P., 1999. Synthèse sur les flux de nutriments apportés par les rivières bretonnes aux eaux côtières. Mémoire Ifremer – INAPG pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome, 86 p.

- Munschy C., Arzul G., Bocquene G., Claisse D., Grossel H., Marchand M., Tissier C., Tixier C., Tronczynski J., 2004. Stratégies pour la surveillance des produits phytosanitaires en milieu marin côtier – Synthèse – Direction de l'Environnement et de l'Aménagement Littoral ; Département des Polluants Chimiques – Ifremer – 45 pages.
- Munaron D., 2004. Étude des apports en pesticides et en nutriments par la Charente aux eaux côtières du Bassin de Marennes-Oléron : Modélisation de la dispersion de l'atrazine dans le bassin de Marennes-Oléron. Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie Paris VI .
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., King K.W., 2002. Soil and Water Assessment Tool, Theoretical document, version 2000. Grassland, Soil and Water research Laboratory; Blackland Research and Extension Center, Texas, 506 p.
- Perdigão Vasconcelos F., 1992. Dynamique de la matière organique et des métaux dans les sédiments de l'estuaire-estran de Pen-Bé (Loire-Atlantique, France). Thèse de doctorat Université de Nantes, 313 p.
- Piriou J.Y. et Droit J., 2001. Apports nutritifs et bactériens en estuaire de Penzé, année 2000. Rapport Ifremer RST.DEL/SR/03.03, septembre 2001, 124 p + annexes.
- Piriou JY., 2002. Apports à la mer côtière. Rapport d'étape année 2000, 50p.
- Piriou JY., Abernot-Le Gac C., 2003. Suivi des apports à l'estuaire de l'Aber Benoît année 2002, 121p.
- Plus M. et Durand N., 2003. Le modèle hydrodynamique du Bassin d'Arcachon ; Description générale et validation – Rapport interne Ifremer – 29p.
- Pommepuy M., Le Guyader F., Miossec L., Gourmelon M., Derrien A., Dupray E., Le Cann P., Caprais M.P., Haugarreau L., Ménard D., Hervio-Heath D., 2000. Le devenir des microorganismes en zone côtière – Exposé de Monique Pommepuy – Journée d'échange organisée par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie – 11 p.
- Pommepuy M., Guillaud J.F., Martin Y., Dupray E., Derrien A., L'Yavanc J. et Cormier M., 1991. Le devenir des bactéries en zone littorale – La mer et les rejets urbains. Bendor. Ifremer. Actes de Colloques 11 ;pp 89 à 100.
- Ponthoreau, C., 2003. Comité de suivi du laboratoire de Pen Avel, décembre 2003. Document de présentation CAP Atlantique, 46 p.
- Ponthoreau, C., 1987. L'organisation biogéologique des milieux paraliques atlantiques : Bassin d'Arcachon, Traict du Croisic. Diplôme de recherche de l'Université de Nantes, faculté des Sciences et Techniques, laboratoire de Biogéologie et Biostratigraphie, 144 p.
- Populus, J., 2002. Altimétrie par Lidar aéroporté et modèles numériques de terrain. Rapport Ifremer RST. DEL/AO/Brest 02-09, 28 p.
- Salomon, J-C., Breton, M. et Pommepuy, M., 1991. Intérêt d'un modèle de transport dissous pour les rejets urbains en zone estuarienne. In La mer et les rejets urbains, Bendor, 13-15 juin 1990. Ifremer, Actes de Colloques, 11, p. 191-204.
- Sauriau, P.G., 1992. Les mollusques benthiques du bassin de Marennes-Oléron : estimation et cartographie des stocks non cultivés, compétition spatiale et trophique, dynamique des populations de *Cerastoderma edule* , Thèse de Doctorat d'océanologie biologique, université de Bretagne Occidentale, 309p.

Sogreah Ingénierie, 1997. Aménagement du secteur du Port Charly et de l'estacade du Croisic – Etude préalable d'agitation et de courantologie – 23 p. + annexes

Sogreah Ingénierie, 2002. Centre marin de Pen Bron – Etude hydraulique et sédimentologique et propositions pour le confortement du perré de protection du centre – Rapport final – 34 p. + figures

Syndicat des Ostréiculteurs de Pen-Bé, 2002. Etat des lieux du domaine public maritime du traict de Pen-Bé Mesquer. Rapport SOGREAH n° 71 1095, 56 p. + annexes.

Thébault, A., 2001. Epidémiologie dans le cas de mortalités anormales de coquillages : exemple des coques du Croisic, Thèse de Doctorat vétérinaire, Ecole nationale vétérinaire d'Alfort, 142p.

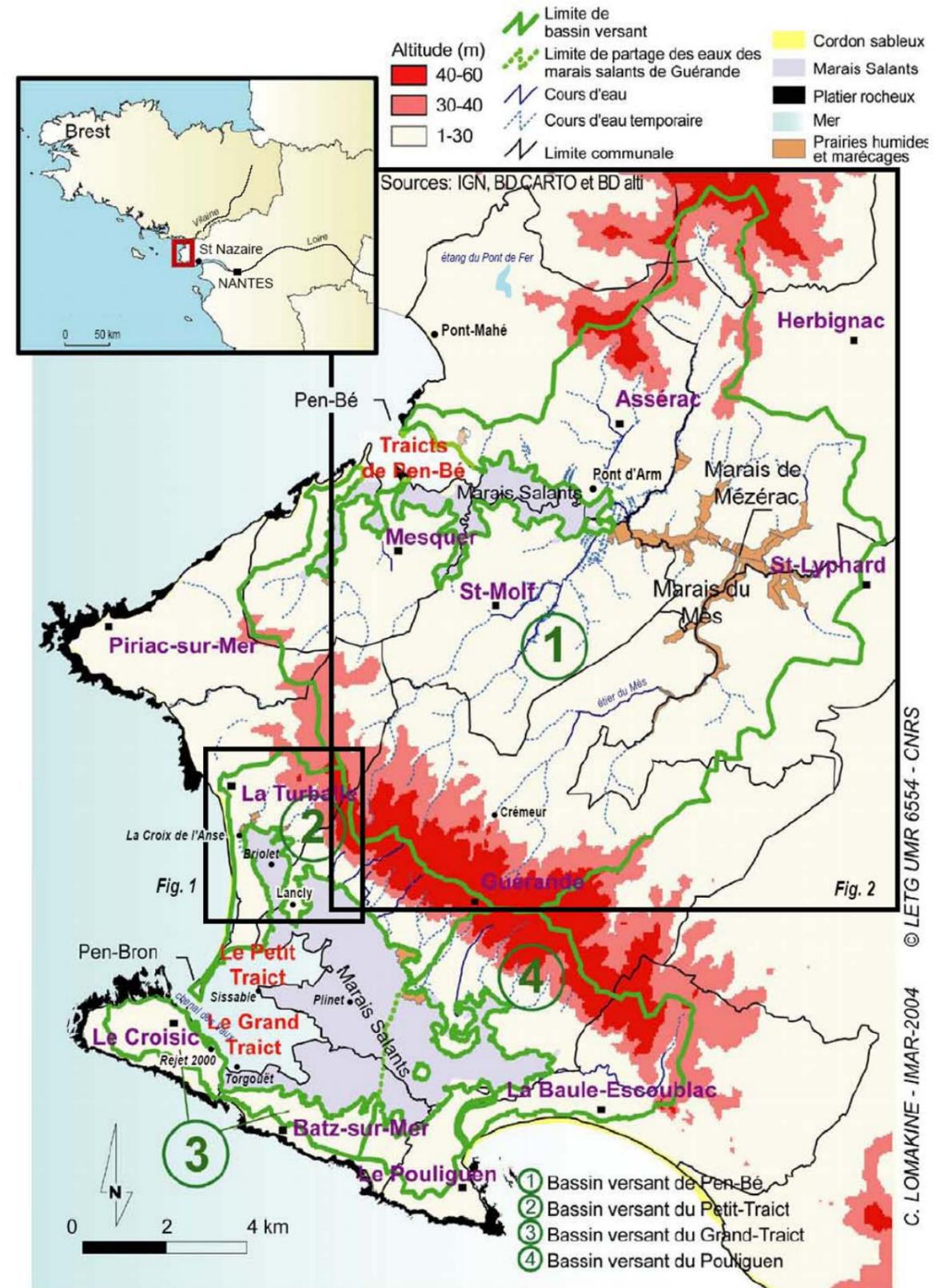
Tronczyński, J. et Moisan K., 1999. Evaluation des flux de phytosanitaires apportés par la Loire à l'estuaire. Rapport Ifremer/DEL/Département Polluants Chimiques, 61 p.

Tronczyński, J., Moisan K., Bocquené G., Maggi P. et Grizon J., 1999. Etude des zones côtières exposées à la contamination par les produits phytosanitaires. Rapport scientifique, Ifremer DEL/PC, 34p.

Wilson, J., 1982. The littoral fauna of Dublin Bay. *Irish Fisheries Investigations*, B, 26, 9p.

Liste des abréviations et des sigles

AFNOR : Association Française de NORmalisation
BD : Base de Données
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CAP Atlantique : Communauté d'Agglomération de la Presqu'île de Guérande-Atlantique
CCI : Chambre de Commerce et de l'Industrie
CIADT : Conseil Interministériel d'Aménagement Du Territoire
CODELA : Comité D'expansion Economique de la Loire Atlantique
CQEL : Cellule Qualité des Eaux Littorales
CREPEPP : Cellule Régionale d'Etudes des Pollutions des Eaux par les Produits Phytosanitaires
CST : Conseil Scientifique et Technologique
DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Fôret
DDASS : Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales
DDE : Direction Départementale de l'Equipement
DEA : Diplôme d'Etudes Approfondies
DEL : Direction de l'Environnement et de l'aménagement Littoral de l'Ifremer
DIREN : Direction Régionale de l'ENvironnement
DPM : Domaine Public Maritime
IAV : Institution d'Aménagement de la Vilaine
Ifremer : Institut français pour l'exploitation de la mer
IGN : Institut Géographique National
JOCE : Journal Officiel des Communautés Européennes
LCPL : Laboratoire Conchylicole des Pays de Loire, Ifremer Bouin
LIDAR : Light Detection And Ranging
MCD : Modèle Conceptuel de Données
MPL/Nantes : laboratoire Ifremer Morbihan – Pays de Loire, implantation de Nantes
NQE : Norme de Qualité Environnementale
REBENT : REseau BENThique
REMI : REseau de contrôle MIcrobiologique
REPHY : REseau de surveillance du PHYtoplancton et des phycotoxines
RGA : Recensement Général de l'Agriculture
RNO : Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin
SAGE : Schéma de Gestion et d'Aménagement de l'Eau
SANDRE : Secrétariat d'Administration Nationale des Données Relatives à l'Eau
SATESE : Service d'Assistance Technique pour les Exploitants de Stations d'Epuration
SIG : Système d'Information Géographique
SIRIS : Système d'Intégration des Risques par Interaction des Scores
SMN : Service Maritime et de Navigation
SMIDAP : Syndicat Mixte pour le Développement de l'Aquaculture en Pays de la Loire
SRPV : Service Régional de Protection des Végétaux
SWAT® : Soil and Water Assessment Tool



Représentation de la zone d'étude et de ses bassins versants principaux

