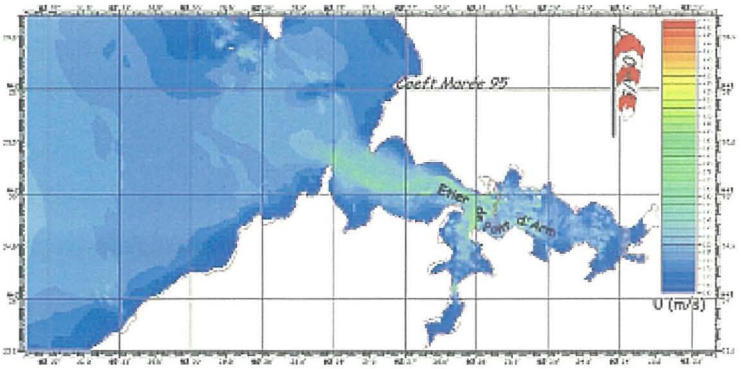
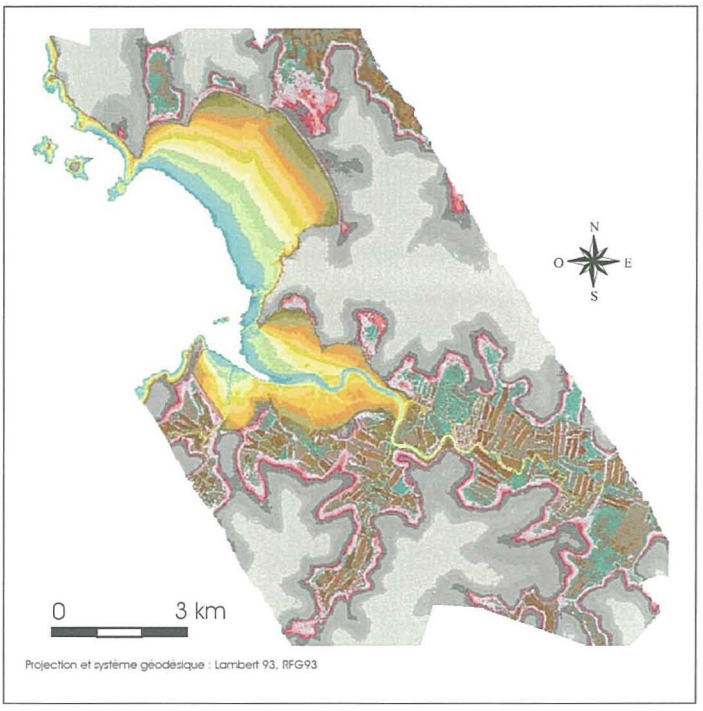
Coordonnatrice : Hélène Jeanneret (1)

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 Ponthoreau (3)

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

Étude des secteurs conchylicoles du Croisic et de Pen-Bé





Bathymétrie LIDAR et vitesse maximale des courants dans le traict de Pen-Bé.

Géolittomer-Nantes
LETG UMR 6554 - CNRS
Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique

Etude des secteurs conchylicoles du Croisic et de Pen-Bé

1. Présentation de la zone d'étude 3
1.1. Activités présentes sur les bassins versants et dans les traicts 4
1.2. Caractéristiques hydrodynamiques des sites 4
1.2.1. Les étiers 5
1.2.2. Volumes oscillants et renouvellement des masses d'eau 7
1.2.3. Impact de la Loire sur les traicts du Croisic 7
1.2.4. Impact de la Vilaine sur le traict de Pen-Bé 9
1.2.5. Cartographie des habitats naturels 10
2. Outils et développements méthodologiques nécessaires au programme 10
2.1. Système d'Information Géographique 10
2.2. Modélisation des apports par les bassins versants 12
2.3. Evaluation des apports dans les traicts 14
2.3.1. Choix des stations et fréquence des campagnes 14
2.3.2. Mesure du débit 16
2.3.3. Paramètres retenus 16
2.4. Modélisation hydrodynamique 16
2.5. Évaluation des stocks conchylicoles 19
2.5.1. Estimation des stocks d'huîtres dans le traict de Pen-Bé 19
2.5.2. Estimation des stocks de moules dans le traict de Pen-Bé 19
2.5.3. Estimation des stocks de coques dans le traict du Croisic 20
2.6. Mise en place d'une base de données sur la qualité de l'eau 21
3. Résultats 22
3.1. Estimation des apports par les bassins versants 22
3.2. Caractéristiques physico-chimiques des étiers 25
3.3. Substances arrivant dans les traicts 27
3.3.1. Nutriments 27
3.3.2. Bactéries 27
3.3.3. Phytosanitaires 28
3.4. Devenir des substances dissoutes dans les traicts 30
3.4.1. Devenir des bactéries dans le traict du Croisic. 30
3.4.2. Devenir des bactéries dans le traict de Pen-Bé 33
3.4.3. Devenir des produits phytosanitaires dans les traicts 35
3.5. Stocks conchylicoles 40
3.5.1. Estimation des stocks de coques dans les traicts du Croisic et évolution dans le temps 40
3.5.2. Estimation des stocks d'huîtres dans le traict de Pen-Bé 42
3.5.3. Estimation du stock de moules dans le traict de Pen-Bé 43

Conclusion et perspectives 44

Bibliographie 49

Liste des sigles utilisés 51

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 (croissance, mortalité, pathologies,...).

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

- Etude des élevages conchylicoles : croissance, mortalité, étude des stocks en élevage ;
- Apports environnementaux : 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, SIG[1] : 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.

Cette étude rassemble des équipes aux compétences complémentaires : le laboratoire DEL/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 re présentent 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 sur 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 un résumé du rapport final, qui fait la synthèse de l'ensemble des données acquises au cours du programme, et qui sera adressé ultérieurement aux membres du CST, avec les annexes correspondantes et une bibliographie complète.

[1] Une liste des sigles figure après la bibliographie

1. Présentation de la zone d'étude

Les bassins versants des traicts[2] 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 (Fig. 1).

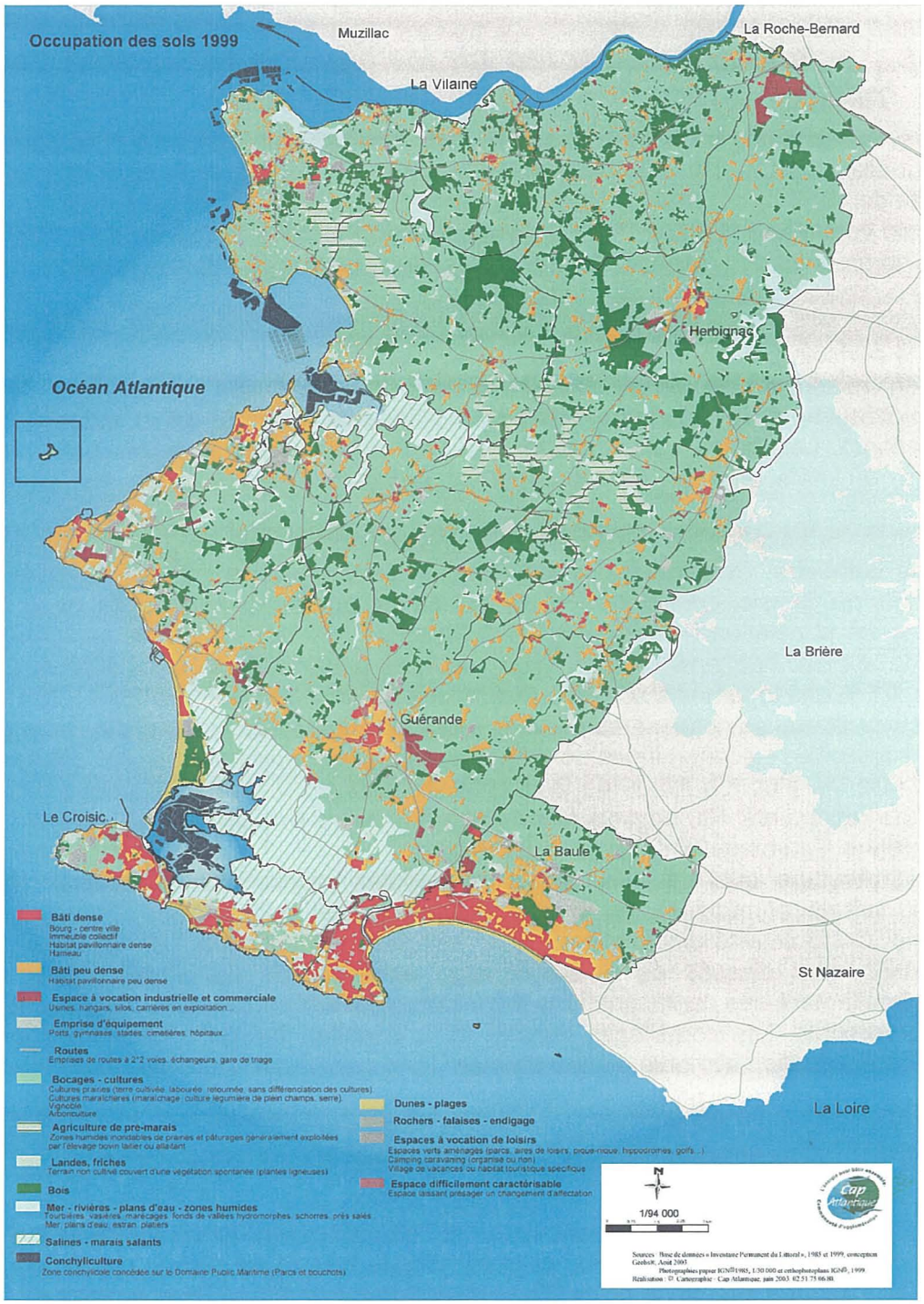


Figure 1. Présentation des bassins versant des traicts du Croisic et de Pen-Bé

[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.

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.

1.1. Activités présentes sur les bassins versants et dans les traicts

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

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 et laitier extensif (77% des exploitations). Les terres qui ne servent pas au pâturage sont utilisées pour produire du fourrage, du maïs ensilage et des céréales destinées à l'alimentation des animaux (CA, 2003).
Par ailleurs, la vocation du territoire est fortement tournée depuis plus d'un siècle vers le tourisme balnéaire. Ceci induit une urbanisation particulièrement dense du bassin versant des traicts du Croisic, considéré également comme un 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 (CODELA, 2003). Par ailleurs, 51 % des logements sont des résidences secondaires (CCI, 2003).
Enfin, sur le littoral se côtoient les activités salicoles, conchylicoles, touristiques et portuaires dont les retombées économiques sont importantes pour le territoire. A titre d'exemple, pour les activités les plus tributaires de la qualité de l'eau et du milieu, on peut indiquer que la saliculture représente 400 emplois directs pour un chiffre d'affaire estimé, en 2002, entre 15 et 17 millions d'euros (CAP Atlantique, 2003).
La conchyliculture quant à elle, représente, toutes productions confondues (palourdes, coques, huîtres et moules), 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.

1.2. Caractéristiques hydrodynamiques des sites

Les modèles MARS 2D, dont la conception et l'utilisation sont détaillées dans les chapitres suivants, ont permis de préciser les caractéristiques hydrodynamiques des traicts, qui sont soumis aux apports directs de cours d'eau d'importance variable. Dans le traict de Pen-Bé, il s'agit de l'étier de Pont d'Arm et de la Vilaine, dont les débits, en périodes de fortes pluies, peuvent atteindre respectivement 10 m³/s (Perdigão-Vasconcelos, 1992) et 1300 m³/s (http://www.lavilaine.com/presentation/presentation.htm).

1.2.1. Les étiers

Dans les traicts du Croisic, les étiers sont de plus 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 (§1.2.3 et §3.4.3).
Sur un cycle 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.
Les courants à l'intérieur des traicts suivent principalement l'axe des chenaux, où l'on observe les courants les plus importants : les vitesses peuvent atteindre 2 m/s dans le chenal principal des traicts du Croisic, et 1,3 m/s à Pen-Bé dans le chenal central et l'étier de Pont d'Arm (Fig. 2).

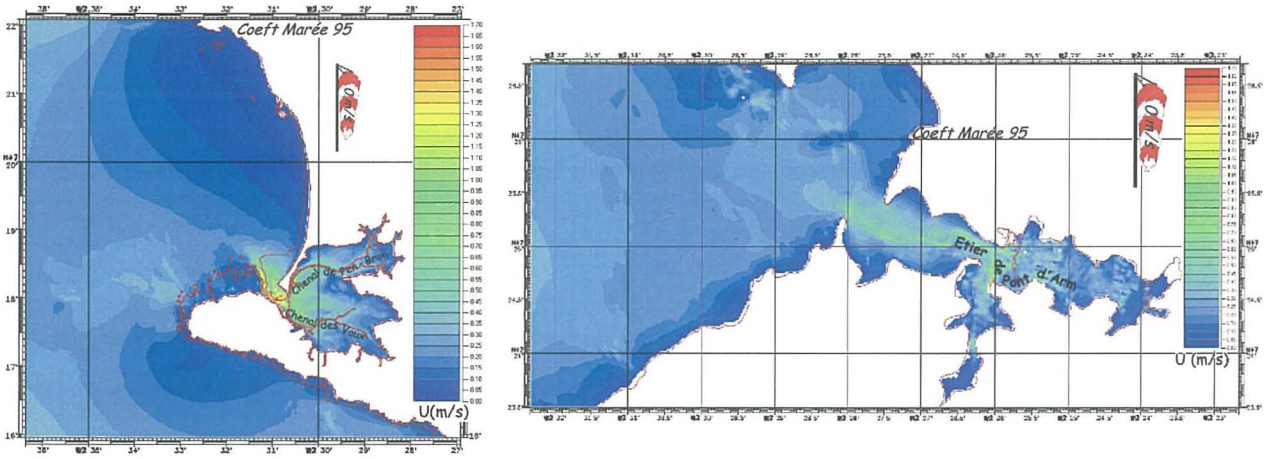


Figure 2. Vitesses maximales dans les traicts du Croisic et de Pen-Bé

Les vitesses maximales observées à marées montante et descendante ne sont pas identiques, et les masses d'eau n'empruntent pas exactement le même chemin au flot et au jusant.

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.
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.
D'autre part, l'influence du vent n'est pas la même selon que l'on s'intéresse à la zone de Pont Mahé ou de Pen-Bé du fait de leurs orientations différentes.

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.
Une importante circulation d'eau est mise en évidence au Nord-Ouest de la pointe du Croisic par la visualisation des débits résiduels[3] (Fig.3). Les masses d'eau se déplacent d'Est en Ouest, de la jetée du Tréhic à la pointe du Croisic.

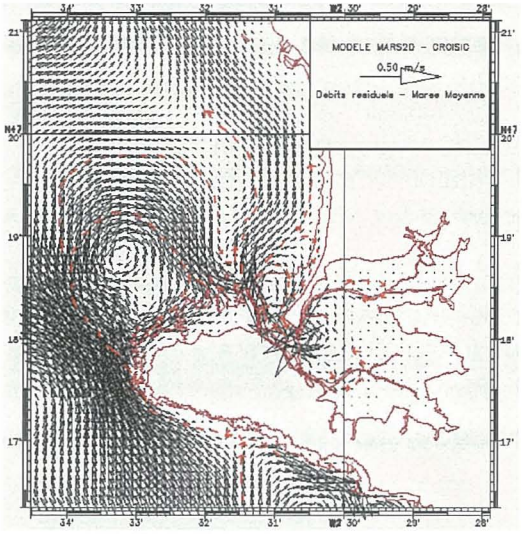


Figure 3. Débits résiduels dans le secteur du Croisic, marée moyenne

La re-circulation vers l'intérieur d'une partie de la masse d'eau sortante est également visible au niveau des Barres de Pen-Bron.
En revanche, les débits résiduels sont minimes à l'intérieur des traicts du fait de la faible profondeur ; on y observe cependant des petites circulations adjacentes (flèches rouges sur la figure 3).

Le transport à l'intérieur du traict de Pen-Bé est dominé, quant à lui, par l'écoulement de l'étier de Pont d'Arm (Fig.4).

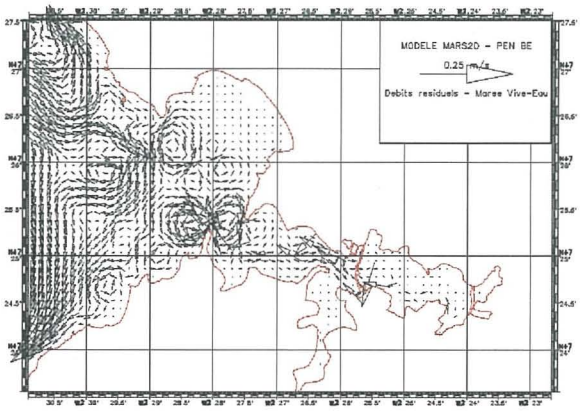


Figure 4. Débits résiduels dans le secteur de Pen-Bé, marée de Vive-Eau

[3] Pour des courants parfaitement symétriques entre le flot et le jusant, la somme des valeurs observées à chaque instant 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.

1.2.2. 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 (Tableau 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.

Vol. Oscillant (Mm^3)	*Coefficient de Marée*	
	45	*95*
Traicts du Croisic	11	20
Traict de Pen-Bé	5	10

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

La modélisation indique que renouvellement tidal des eaux des 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 stock d'eau évacuée à marée basse est ainsi réintroduite dès la marée suivante.
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. Compte tenu de sa morphologie « en entonnoir », le traict de Pen-Bé présente 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 et indiquent un bon brassage des zones d'étude.

Taux de renouvellement au bout de 5 marées	
Traicts du Croisic	30% ~ 58%
Traicts de Pen-Bé	41% ~ 92%

tableau 2. Taux de renouvellement moyens calculés pour les zones des traicts du Croisic et de Pen-Bé

Ces deux bassins versants se situent entre les grands estuaires de la Loire et de la Vilaine ; les modèles développés pour mener à bien cette étude ont permis une évaluation préliminaire de la part des apports imputables à ces estuaires dans les traicts pour les comparer aux apports terrigènes directs. En effet, cette évaluation ne peut être simplement obtenue par des mesures in situ, qui fournissent un niveau de pollution global.

1.2.3. Impact 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. Une contamination des eaux ligériennes a donc un impact inévitable sur ce secteur.
Les apports de la Loire ont été évalués grâce à une méthode indirecte, qui 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'apport continental local en eau douce sur la zone. La salinité réelle, connue au point de suivi de l'Ifremer, traduit quant à elle la part d'eau douce dans l'eau de mer, soit l'apport continental (et pluvial) global à un instant donné. 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 *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 locale (Fig.5) a été effectuée dans ce but. Les conditions environnementales (marée et vent) correspondent à celles du mois d'avril 2004. 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.24). Un débit constant, égal à 10L/s, a été choisi pour ces rejets.
Un premier constat important 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.
Au point de suivi REPHY Le Croisic (Fig.5), on peut, suite à cette simulation, estimer que la quantité d'eau douce d'origine marine (provenant principalement de l'estuaire de la Loire), représente entre 75 et 90% de l'eau douce responsable de la dessalure mesurée. Il s'agit donc d'un apport considérable, qui signerait un impact prépondérant si les concentrations en polluants dissous dans le panache de la Loire étaient du même ordre de grandeur que celles mesurées dans les étiers.

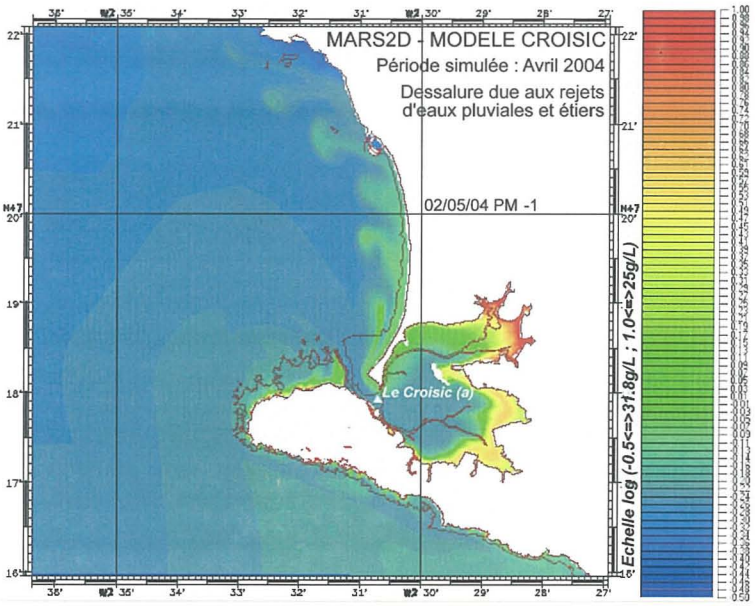


Figure 5. Carte de dessalure du secteur du Croisic due à l'hydrologie locale

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 résultats 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 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 ultra-violets. Enfin, les concentrations en substances dissoutes et particulaires vont varier au cours d'une période de crue et seront décalées, en temps, par rapport aux apports dus aux lessivages du bassin versant guérandais. L'impact sera donc, pour certains composés, variable dans le temps, avec un pic de pollution moins important mais plus persistant. L'estimation des apports respectifs en diuron par la Loire et les étiers sera étudiée au chapitre sur les phytosanitaires.

1.2.4. Impact de la Vilaine sur le traict de Pen-Bé

Contrairement à l'estuaire de la Loire qui, du fait de son étendue et de son fonctionnement complexe, a été exclus 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'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.

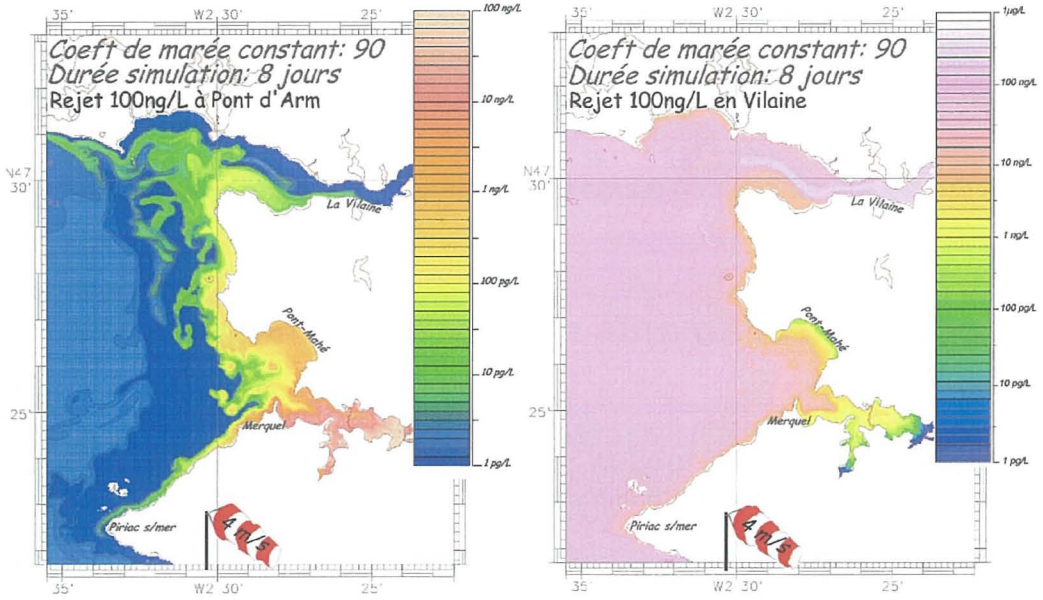


Figure 6. Impact respectif de l'étier de Pont d'Arm et de la Vilaine à flux constant

Une simulation a été effectuée à concentration constante au cours du temps, et égale à 100ng/L pour chaque rejet. On se rend alors compte de l'importance du débit associé sur l'impact dans la zone d'étude. Les débits utilisés correspondent à des valeurs mesurées en période de crue. Ils sont de 1300m^3/s pour la Vilaine, et de 2m^3/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 flux, 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'étale, tandis que la Vilaine impose la qualité de son eau à pleine mer.
Les période de vives-eaux favorisent également 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 flux. 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 3.4.3.

1.2.5. Cartographie des habitats naturels

Enfin, dans le cadre de la mise en place du réseau de surveillance benthique REBENT, 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 chronique ou accidentelle.
http://www.ifremer.fr/rebent/index2.htm
Ces résultats, qui ont été obtenus en marge de cette étude, apparaîtront néanmoins dans le rapport final.

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.

2.1. 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 : modèle numérique de terrain (MNT), géologie, réseau hydrographique, usages du sol, localisation des haies, données agricoles, qualité des eaux,... Elles sont détaillées dans le tableau 3.

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.

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

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

tableau 3. Inventaire des données utilisées dans le SIG (Lomakine, 2005)

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 (Lomakine, 2005). 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.

Évaluation empirique des apports agricoles à partir du RGA (Laurent, 1996).
L'évaluation des apports d'azote et de phosphore peut se faire à partir du recensement général agricole (RGA). Cette méthode 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 seront pas pris en compte dans la méthode.
La méthode consiste, à partir de données du RGA à l'échelle communale, de 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. Mais une incertitude sera toujours présente, car les données communales prennent en compte les informations du siège agricole situé sur la commune. Or, les parcelles appartenant à cette même exploitation peuvent se retrouver en dehors de la commune.

Évaluation des risques de transfert de polluant par hiérarchisation de facteurs (analyse multicritère)
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) par bassin versant et par parcelle à partir de la hiérarchisation des facteurs et des critères les uns par rapport aux autres. 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. 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. 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.

Évaluation des risques par la méthode de zonage de zones sensibles (analyse multicritère et approche overlay)
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 créer une couche contenant le zonage du potentiel de pollution en fonction de facteurs classés selon certains critères comme précédemment mais sans hiérarchisation de ces facteurs. La deuxième étape consiste à définir les zones sensibles qui correspondent aux surfaces reliées directement aux cours d'eau. La dernière étape consiste à réunir les deux premières pour enfin obtenir une carte des risques parcellaires définis en 4 classes.

2.2. Modélisation des apports par les bassins versants

Les informations issues du SIG ont été couplées avec un modèle agro-pédologique ; 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 (tableau 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 :

- 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.

Grâce à ses fonctions, le logiciel SWAT permet de distinguer les origines des apports et de déterminer l'intensité des flux entrant et sortant des bassins versants. 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.

2.3. Evaluation des apports dans les traicts

2.3.1. Choix des stations et fréquence des campagnes

L'état des lieux sur les sources de pollution potentielles réalisé par Morin en 2002 a porté sur les différentes activités identifiées sur le secteur : urbaine, agricole, artisanale et portuaire. Cette étude préalable 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 consisté à mettre en place ce suivi et à 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. 7).

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 Lequer) 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).
En 2003, compte tenu du déficit pluviométrique et de l'absence d'écoulement dans les étiers, seules 3 campagnes ont pu être réalisées 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.

Compte tenu du rôle de la pluviométrie dans le transfert des polluants vers les traicts, et après analyse des données de Météo France, les prélèvements ont été réalisés, si possible, après une forte pluviométrie (>10mm en 24 heures) pour évaluer les pics d'apports, et, à défaut, après un événement pluvieux de 7 à 25 mm de précipitations cumulées sur 3 jours, afin d'estimer les apports chroniques.

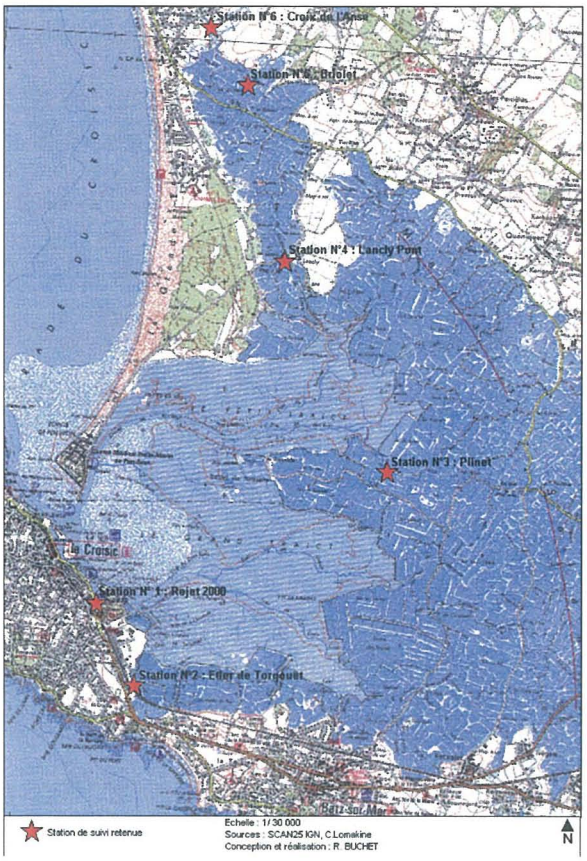


Figure 7. Localisation des points de prélèvements échantillonnés en 2003 et 2004 dans le secteur du Croisic.

Parallèlement, la méthodologie d'inventaire a été transposée facilement au suivi des apports sur le bassin versant du Mès, qui est à dominante agricole. 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 m^3/s en moyenne ; c'est pourquoi, dans un premier temps, les mesures de débit et de concentration ont été réalisées uniquement à Pont d'Arm (Fig. 8). Signalons que cette approche préliminaire a été confortée par les résultats de la modélisation (§3.4.2.).

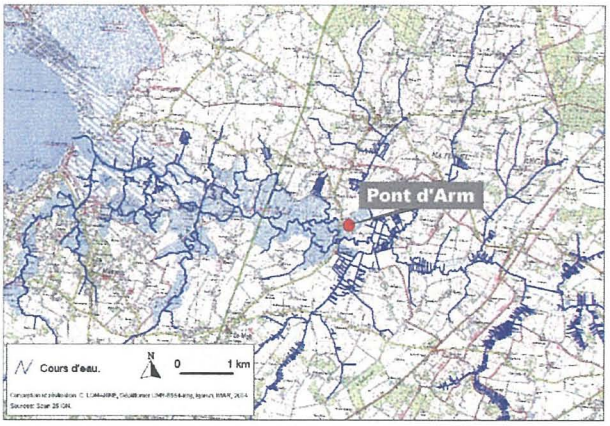


Figure 8. Localisation de la station de suivi de Pont d'Arm

2.3.2. Mesure du débit

La mesure du débit a été effectuée par la « méthode d'exploration du champ de vitesse », avec un débitmètre à moulinet et selon les prescriptions établies dans la norme européenne NF EN ISO 748 (AFNOR, 2002).
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.
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. Dans certains cas, nous avons donc choisi d'utiliser, après l'avoir validée, une méthode volumétrique alternative, qui 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.

2.3.3. 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 zinc[4], susceptibles d'être présents dans le milieu compte tenu des activités rencontrées sur les bassins versants). La méthodologie des prélèvements et les prescriptions particulières en fonction des différents paramètres (type de flaconnage, volume à prélever, port éventuel de gants, étiquetage, stockage,...) sont détaillées par Buchet (2003).

Pour ce qui est des produits phytosanitaires, l'état des lieux réalisé en 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 (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 auquel nous avons confié les analyses (Centre de Génie Industriel à Guidel, Morbihan) 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.

2.4. Modélisation hydrodynamique

Sous l'action de la houle et des courants, une pollution en bordure littorale va être transportée, diluée et dispersée pour finalement aboutir à une distribution spatiale

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

difficilement prévisible sans un outil qui prenne en compte l'ensemble de la zone hydrodynamique et des paramètres en jeu. Des modèles numériques se sont rapidement développés à cet effet au cours des dernières années, grâce en particulier aux progrès de l'informatique, qui facilitent la résolution des équations complexes de l'hydrodynamique. Ils permettent ainsi de visualiser le comportement des masses d'eau et de prévoir le devenir des contaminants, larves de coquillages, et éventuellement 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, bactériologiques…).
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 notre zone d'étude, nous avons entrepris l'acquisition de données bathymétriques grâce à la technique du laser aéroporté (LIDAR : LIght Detection And Ranging = détection de la lumière et mesure à distance, proche du RADAR), qui 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).

Le plan de vol a été adapté à la morphologie du secteur, et le traitement des images a permis d'obtenir, au Croisic comme à Pen-Bé (Fig. 9), une représentation très précise de la bathymétrie.

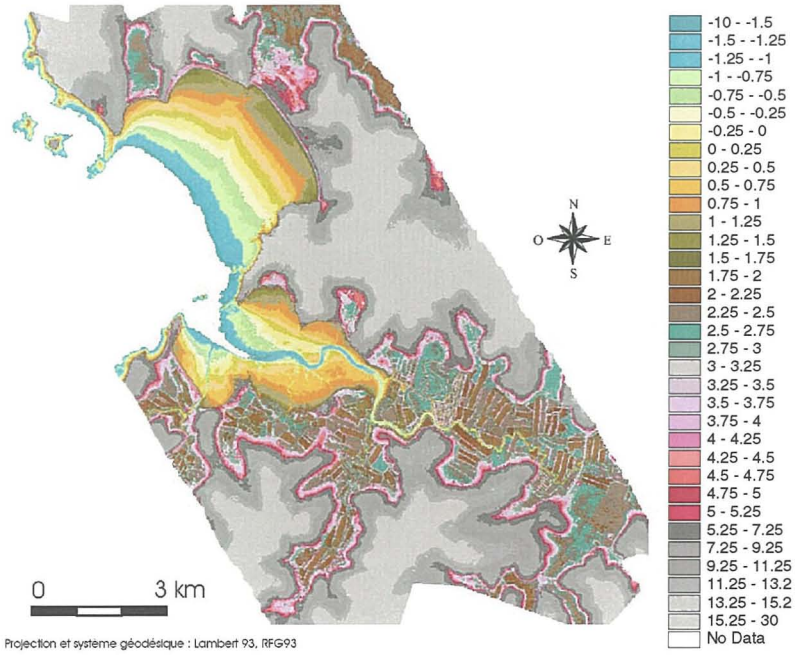


Figure 9. Pen-Bé : données altimétriques issues de la mission LIDAR de septembre 2002 (hauteurs en mètres)

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 des 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 la masse d'eau est homogène sur la verticale.
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.
Afin d'obtenir la précision requise sur le secteur étudié, le modèle MARS-2D part d'un modèle de grande emprise (le golfe de Gascogne) et de grande maille (plusieurs 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 le secteur étudié.
Dans l'immédiat, seuls les éléments dissous sont pris en compte (nutriments, phytosanitaires, bactéries) ; le transport des sédiments n'est pas reproduit. Dans le cas des bactéries (ici les germes tests *E. coli*) dont le comportement n'est pas conservatif, la valeur du T90[5] est prise en compte par le modèle.

Le modèle réalisé au Croisic s'étend de Piriac-sur-mer au sud de Batz-sur-mer (150 084 mailles de 30 m de côté).
Conçu selon la même technique, le modèle réalisé sur Pen-Bé (Fig. 10) s'étend de l'estuaire de la Vilaine à Piriac-sur-mer ; il est composé de 354 900 mailles carrées de 30 m de côté.

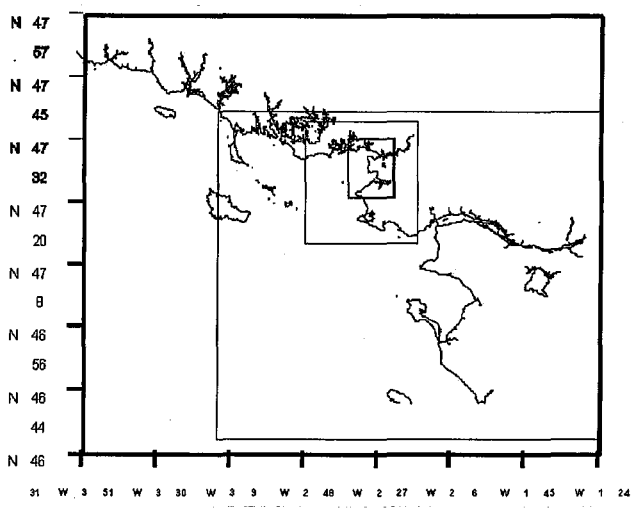


Figure 10. Emboîtement des modèles sur le secteur de Pen-Bé

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, et consiste, selon le processus de la figure 11, 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. Nous nous sommes appuyés sur les données existantes (hauteur d'eau, courantologie, salinité), que nous avons complétées grâce à deux campagnes de mesures en effectuées au large de Pen-Bé et du Croisic, en juillet et septembre 2004 (mesures courantologiques au moyen d'un ADCP – Acoustic Dopler Current Profiler – et mesures de salinité).

[5] T90 : temps au bout duquel 90% des bactéries ont disparu

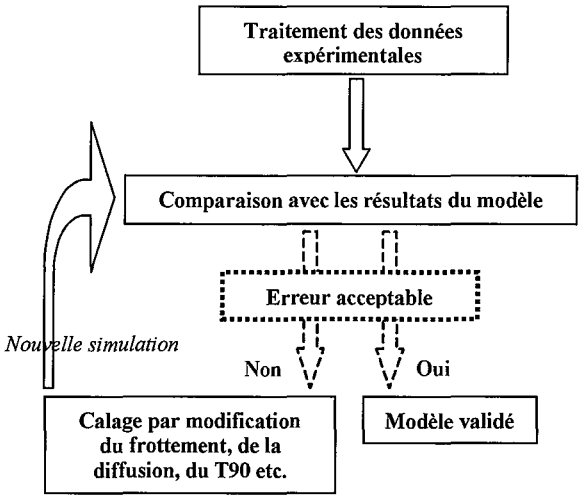


Figure 11. Processus de validation

2.5. *Évaluation des stocks conchylicoles*

2.5.1. 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 80 ha dont la moitié seulement est exploitée.
Ce bassin, qui présente de bonnes potentialités de croissance a vu cependant une diminution de sa production par suite de mortalité des huîtres, ainsi qu'une perte de qualité due à une infestation par le ver *Polydora*, liée en partie à l'envasement du traict. Depuis 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. Cette première estimation du stock d'huîtres en élevage permettra ainsi de disposer d'un point zéro en début de travaux de restructuration, et 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 de l'Ifremer.

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 (mesure sur le terrain des longueurs de tables vides et occupées pour chaque classe d'âge et type de support, collecte et pesée des huîtres) pour obtenir un poids par m^2.
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.

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

Depuis quelques années, 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.
Ici aussi, les surfaces et les longueurs cultivées ont été calculées par photographie aérienne. Le travail sur le terrain a permis de diviser les 4 ha en parcelles homogènes (en fonction de la taille des pieux, de l'espacement entre bouchots etc.), sur lesquelles on a dénombré le nombre de pieux vides et garnis de moules, et estimé le poids de moules par pieu, afin d'aboutir à une évaluation du stock total en élevage.

2.5.3. 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 des traicts du Croisic comprend plusieurs types d'élevages : huîtres creuses (*Crassostrea gigas)*, moules (*Mytilus edulis)*, palourdes(*Venerupis spp.)*, et coques (C*erastoderma edule*). Ces dernières représentent la principale activité des traicts avec environ 140 hectares de concessions soit 76 % de la surface allouée aux conchyliculteurs. La production de coques est de 1200 à 2000 tonnes par an, ce qui fait de ce secteur 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 (Bonnel, 1986).
Afin d' appréhender l'état du stock 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, 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.
Une stratification préalable, à partir de la nature du sédiment (sableux ou sablo-vaseux) et du type de culture (semé ou non semé), a été réalisée (Fig. 12).

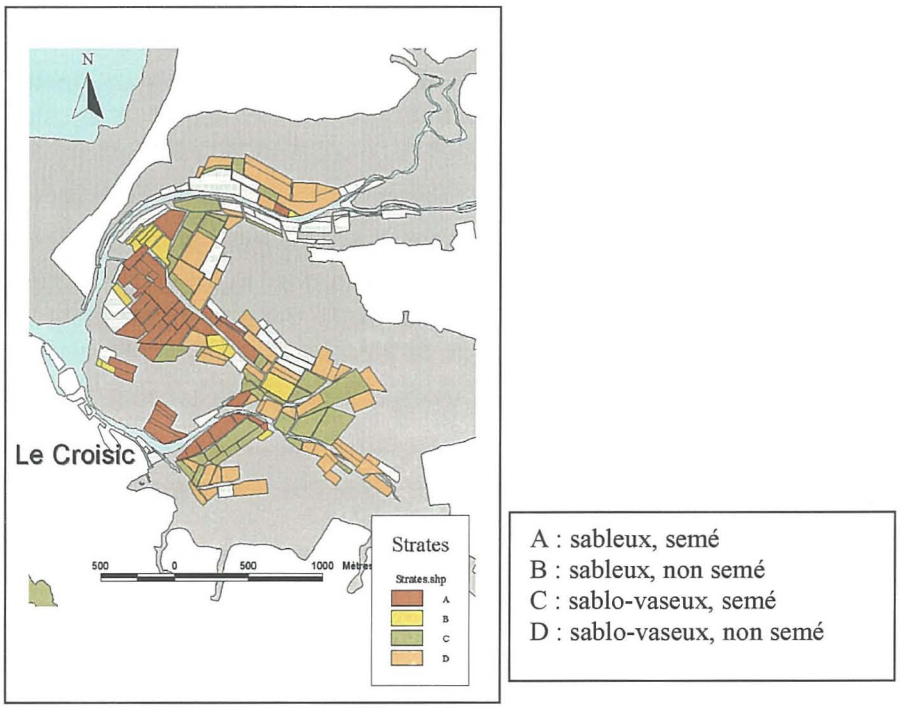


Figure 12. Stratification de la zone d'étude

Pour atteindre la précision souhaitée de 15%, 31 concessions ont été échantillonnées. Parallèlement, un pré-échantillonnage avait permis de fixer à 15 le nombre de points de prélèvement (cadrats de 1/10m²) par concession ; les coques ont été récupérées sur un tamis de maille 4mm, pour faciliter ultérieurement le tri, le dénombrement et la biométrie des coques vivantes. Les évaluations de stocks ont eu lieu en juin 2001, septembre 2001 et janvier 2002.

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 été ensemencée en naissain de coques alors que l'autre a été laissée en l'état pour l'évaluation du recrutement local.
Des échantillonnages bimensuels à l'aide d'un cadrat de 1/16 m^2 ont permis de suivre l'évolution des populations de coques dans chaque parcelle en biomasse, densité et répartition par classe de taille.

2.6. Mise en place d'une base de données sur la qualité de l'eau

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/ Mais, 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 corréler 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 ») :

- 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 de leurs mises à jour.

Ces informations sont recensées dans un catalogue des données.
Puis, l'organisation logique des données au sein de la base a été représentée afin de construire un Modèle Conceptuel de Données (MCD). 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 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 SANDRE[6], ce qui autorise les échanges de données avec les bases de données existantes, comme l'outil Quadrige 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 résultas d'analyses.
- Etc.

Enfin, plusieurs formulaires ont été créés pour offrir une interface de saisie et de consultation pour le futur utilisateur.

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.

3. Résultats

3.1. 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, puis des simulations à l'échelle d'une année.
Les résultats sont restitués grâce à une cartographie chronologique, qui permet de distinguer la variabilité de la dynamique des différents bassins élémentaires, et de distinguer ceux qui présentent le plus de risques.
La figure 13 présente les flux de diuron, herbicide utilisé à la fois en le milieu agricole et en milieu urbain, sur le bassin versant des traicts du Croisic (la norme d'application du diuron ne doit pas dépasser 1,5kg/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 flux simulés du 20 avril 2004 sont équivalents aux flux observés.

La figure 10 permet 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

[6] SANDRE : Secrétariat d'Administration Nationale de Données Relatives à l'Eau

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 (§3.3.3). Le point de mesure de flux semble donc stratégiquement bien placé, même si la simulation prévoit que le maximum se situe 2 jours auparavant, lors du maximum pluviométrique.

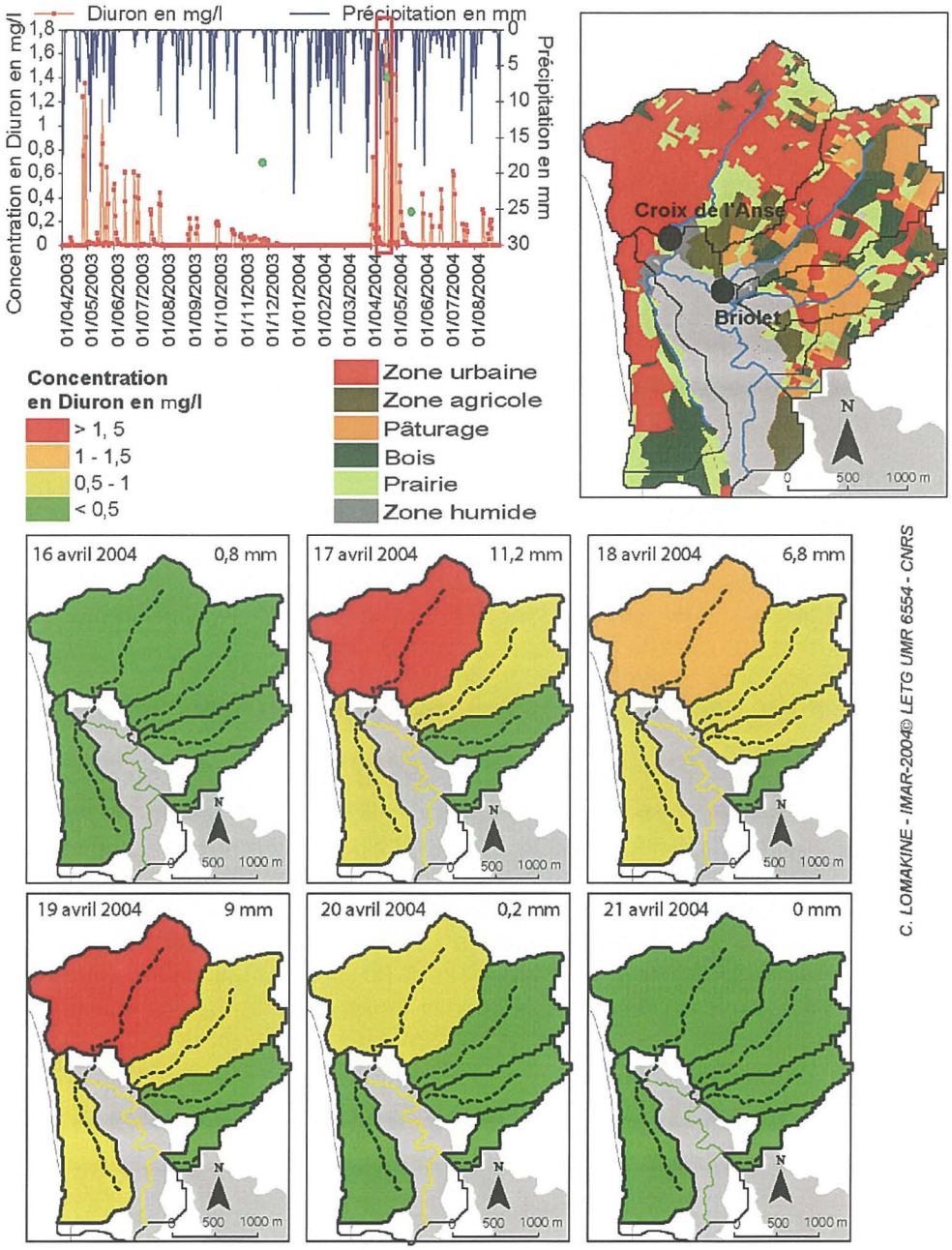


Figure 13. Simulation journalière du diuron sur le bassin versant de Lancly (traicts du Croisic) lors d'un épisode pluvieux du 16 au 21 avril 2004

Le cours d'eau du bassin versant de la Croix de L'Anse montre une persistance de concentrations élevées lors des premiers épisodes pluvieux et après une application de cet herbicide. La même simulation sur le bassin versant de Pen-Bé a également montré des flux identiques à ceux observés.

Une autre simulation, réalisée avec l'isoproturon (herbicide employé uniquement en agriculture sur les cultures de céréales) sur le bassin versant de Pen-Bé (application de 1 kg/ha le 1er avril 2004 sur blé et maïs), a permis de mettre en évidence l'existence d'un sous bassin versant plus polluant (le Belou), et de proposer la réalisation de mesures de flux à l'exutoire de ce sous-bassin versant.

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. Le bassin versant de Pen-Bé est modérément contaminé par les produits phytosanitaires utilisés en agriculture. Cette caractéristique s'explique probablement par l'orientation agricole, par les caractéristiques paysagères de ce bassin versant où une importante zone humide est présente, et par la dilution marine dont le modèle ne peut mettre en évidence les effets.

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. 14). 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.
La simulation des flux de phosphates a également été réalisée ; 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.

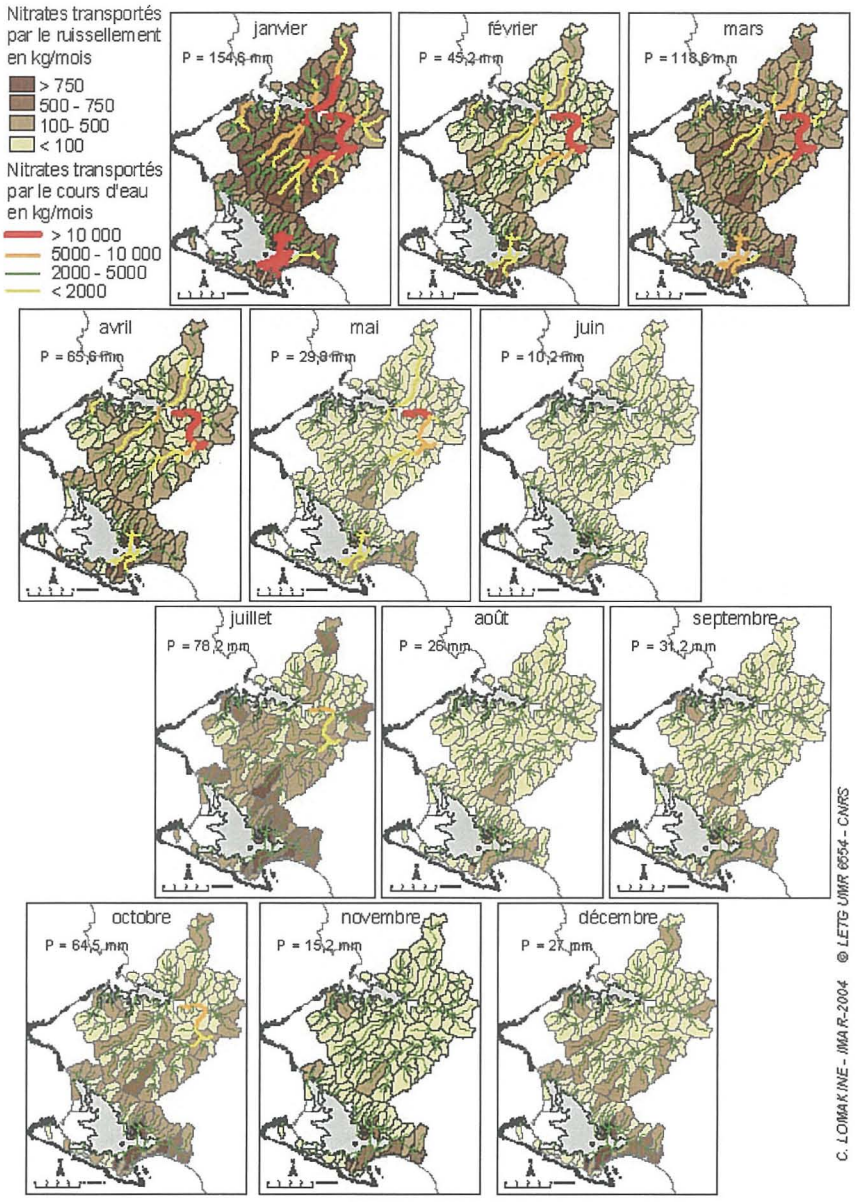


Figure 14. Simulation mensuelle des flux de nitrates en 2001

Une simulation des flux de coliformes fécaux a aussi été réalisée, en ne prenant en compte dans un premier temps que les flux issus des surfaces urbanisées. Bien que les résultats obtenus soient cohérents avec les mesures réalisées sur le terrain par la DDASS, le laboratoire de Pen-Avel 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.

3.2. Caractéristiques physico-chimiques des étiers

Les mesures de débits effectuées sur les étiers permettent de distinguer, sur les 7 points de suivis, trois types différents :

- 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 Lancly, dont les débits mesurés sont compris entre 100 et 300 litres par secondes.

- 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 (cf ; §1.2.1).

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.

Certains étiers présentent toujours des salinités élevées (Plinet, Lancly, 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 PSU[7]. Le rejet 2000, qui est en principe un rejet strictement pluvial, présente régulièrement une salinité variant de 12 à 25 PSU, qui pourrait traduire des raccordements sauvages d'eau de mer (Fig. 15).

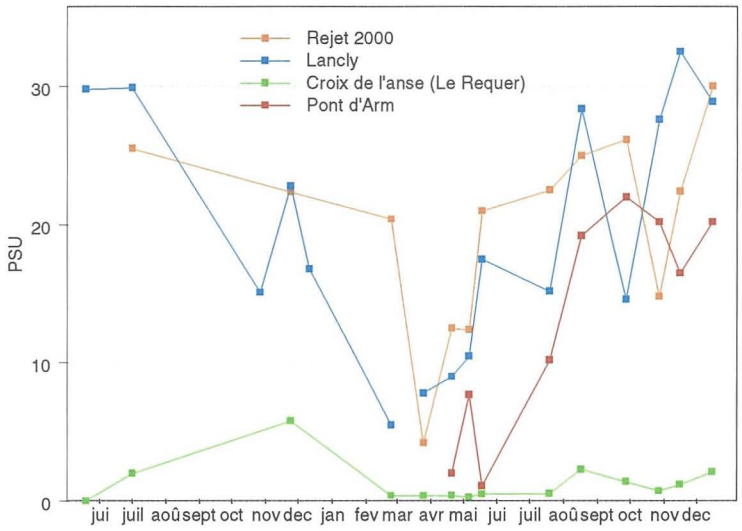


Figure 15. Evolution de la salinité dans plusieurs étiers en 2003 et 2004.

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 & 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 5 mg/L ; 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.

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.

[7] PSU : Practical Salinity Unit, unité de salinité

3.3. Substances arrivant dans les traicts

3.3.1. Nutriments

Les teneurs observées en nutriments, sur les 7 points répartis autour du traict du Croisic et celui de Pont d'Arm dans le traict de Pen Bé, sont faibles. Localement ces points de suivi sont surtout très différents et disparates en fonction de la pluviométrie.
En effet, on distingue des étiers pour lesquels l'augmentation des débits est liée à l'augmentation des concentrations en nutriments : c'est le cas des étiers de Lancly, Pont d'Arm, Briolet et Plinet.
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).
Les teneurs les plus importantes sont observées au point de Rejet 2000 pour l'ammonium, caractéristique d'un rejet urbain. Pour le nitrate, les valeurs maximales sont mesurées au rejet de Croix de l'Anse, et pour le phosphate, au Rejet 2000, à l'étier de Briolet et à l'étier de Pont d'Arm.
Bien qu'il existe une dilution des apports après un épisode pluvieux, le calcul des flux instantanés indique que les flux les plus importants sont liés aux débits les plus forts : Pont d'Arm, Lancly et Plinet. 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 à 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 étiers et les traicts (Ponthoreau), et ne traduisent pas d'augmentation significative de ces paramètres. C'est pourquoi, la simulation 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 (§1.2.1), il faudra néanmoins veiller à ce que ces apports restent à des faibles concentrations, afin d'écarter tout risque d'eutrophisation. La modélisation des apports avec SWAT mis en évidence sur les bassins versants des points dont le suivi permettrait d'optimiser la surveillance des apports continentaux (§3.1). D'ores et déjà, on pourrait proposer de remplacer le suivi mensuel existant sur plusieurs points des étiers 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.

3.3.2. Bactéries

Le suivi du germe test *E. 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. Néanmoins, cette approche était nécessaire pour détecter les étiers 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 Lequer, mais, compte tenu des débits mesurés, les flux instantanés les plus importants ont été mesurés à Pont d'Arm et Plinet (Fig. 16).
Ces mesures d'*E. coli*, qui ne prétendent pas donner une vision exhaustive de la contamination bactériologique des étiers, ont néanmoins permis de valider le modèle SWAT et 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.

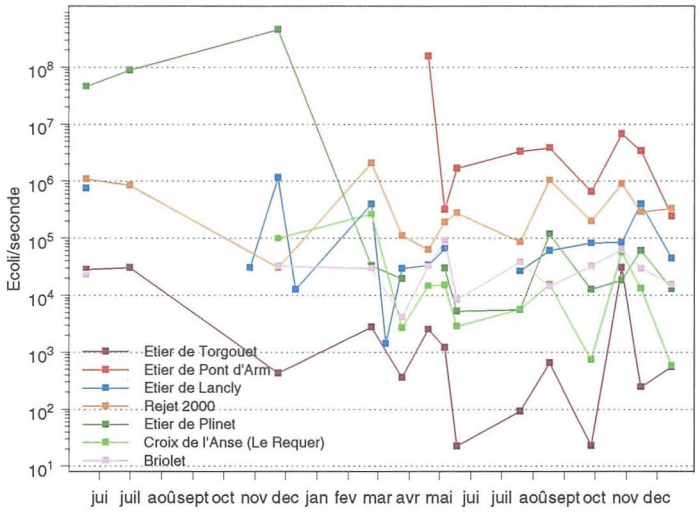


Figure 16. Flux instantané d'*E. coli*

3.3.3. Phytosanitaires

Sur plus de cent molécules recherchées, 31 ont été détectées au cours du suivi (Fig.17). 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).

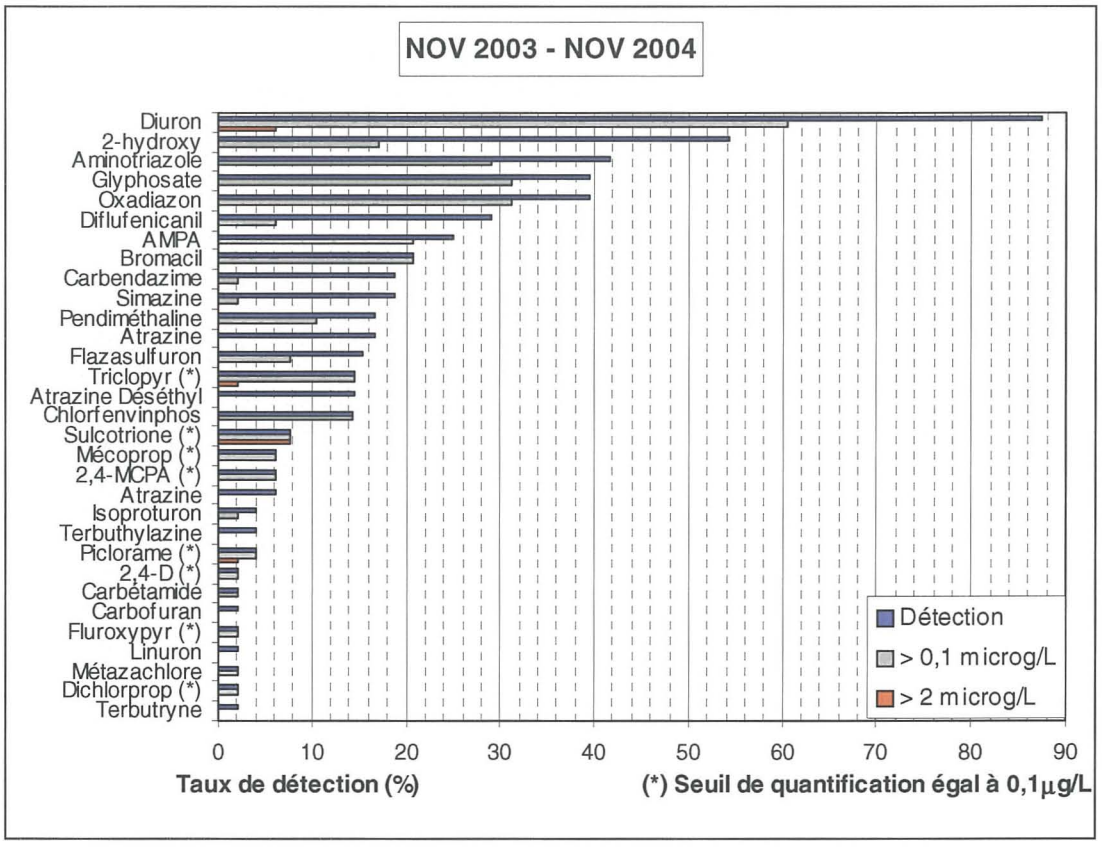


Figure 17. Taux de quantification des molécules détectées au cours du suivi 2003-2004

Les quatre molécules les plus utilisées par les communes sont également celles qui ont été le plus souvent détectées au cours du suivi (Fig. 18). Il s'agit du glyphosate (40%), de l'aminotriazole (42%), du diuron (88%) et de l'oxadiazon (40%). Parmi les substances détectées, cinq figurent sur la liste prioritaire établie par la Directive Cadre sur l'Eau, (DCE, qui comporte dix pesticides) et devraient faire l'objet d'un suivi systématique après la mise en place de la directive (2007) : le diuron détecté de façon quasi-systématique (88% des prélèvements), 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 (AMM non renouvelée car la substance active n'est pas inscrite à l'Annexe I de la dir. 91/414/CE) et le dichlorprop.
La terbuthylazine est également interdite d'utilisation à partir du 30 septembre 2003 (Auby et Maurer, 2004). Son produit de dégradation, la terbuthylazine desethyl, 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.
Ce résultat montre le fort impact des pratiques communales sur la qualité du milieu dans la mesure où chaque substance utilisée, particulièrement en zone urbaine (lessivage des sols important), est retrouvée dans l'eau.

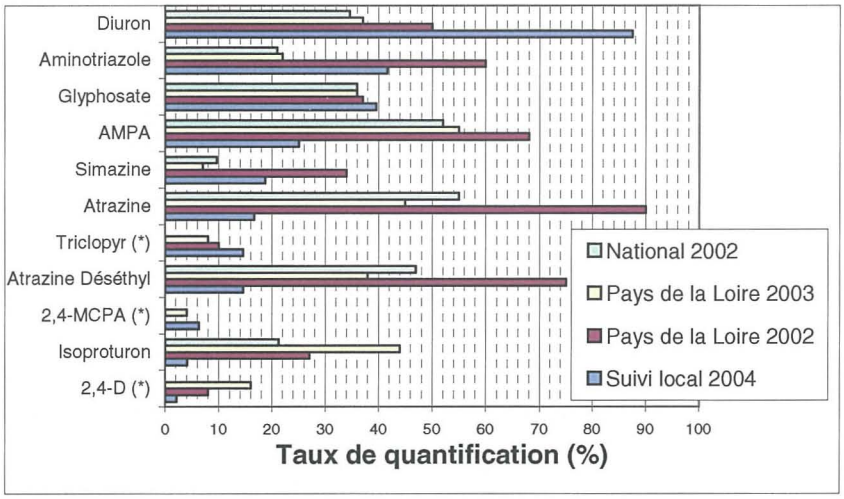


Figure 18. Taux de quantification locaux, régionaux et nationaux de quelques molécules

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, 2004, Fig. 17).

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 (Tableau 4).

Seul le triclopyr, parmi les neuf molécules utilisées pour cette comparaison, 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. En revanche, la forte concentration en Diuron mesurée en 2004 à deux reprises (6,2µg/l le 20 avril et 6,5µg/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). Les concentrations mesurées dans ce rejet au cours du suivi sont inférieures à 0,16µg/l pour quatre des sept campagnes de mesures réalisées. Les pics enregistrés ne peuvent donc en aucun cas être assimilés à une rémanence du produit dans les sols.

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	2,2	20,0 (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

tableau 4. 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

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.

3.4. Devenir des substances dissoutes dans les traicts

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 aucune avec l'hydrodynamique ou les sédiments. Les phénomènes d'adsorption de polluants sur les matières en suspension (MES) ne sont donc pas pris en compte par le code de calcul.
On s'appuiera, danscette 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.. La palette de couleurs utilisée est basée sur les normes en vigueur pour le classement des zones de production conchylicoles, un facteur de concentration de 30 étant choisi entre l'eau et les coquillages..

3.4.1. Devenir des bactéries dans le traict du Croisic.

Le modèle hydrodynamique permet de visualiser l'impact du vent et de la marée, mais aussi de caractériser les risques inhérents à chaque rejet. La valeur du T90 est égale à 40h. Dans un souci de lisibilité, et sauf mention contraire dans le texte, les flux utilisés sont multipliés

par 5000. Les quatre rejets et étiers pris en compte sont Rejet 2000, Torgouët, Plinet et Lancly (Fig 7 p. 14).

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.19). 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.19C).

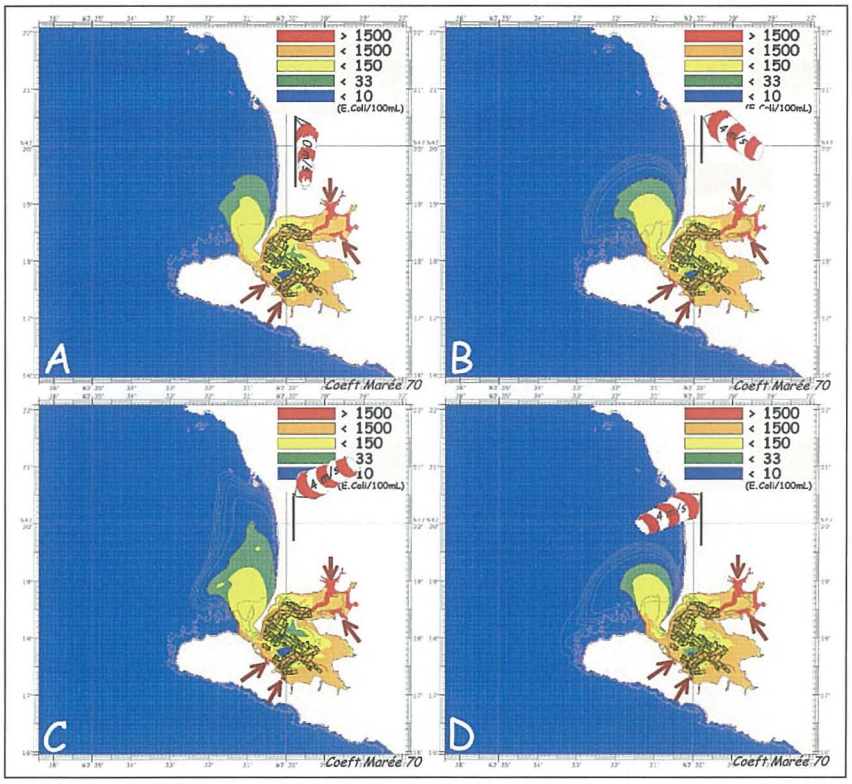


Figure 19. concentrations moyennes calculées sur un cycle de marée en fonction du vent.

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.19D), certainement en provenance de Lancly et Plinet – soit à en confiner d'autres, 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 être légèrement favorisé par des vents nuls (Fig.19A), ou de secteur Ouest-Sud-Ouest (Fig.19C) qui vont confiner les pollutions en bordure des traicts, hors des zones conchylicoles.
Parallèlement, l'étendue du panache est fonction croissante du coefficient de marée, 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.

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 (5.10^8 *E. coli*/s) appliqué à chaque rejet. Avec les flux réels, on observe (Fig.20), le plus fort impact (zone la plus étendue et concentrations les plus fortes) pour Rejet 2000 (Fig.20A), le plus faible étant pour Torgouët (Fig.20B), qui présente cependant un panache très étendu et dilué. Enfin, les zones touchées par les rejets issus des étiers de Plinet et de Lancly sont assez similaires, le Petit Traict étant toutefois plus fortement touché par l'étier de Lancly.

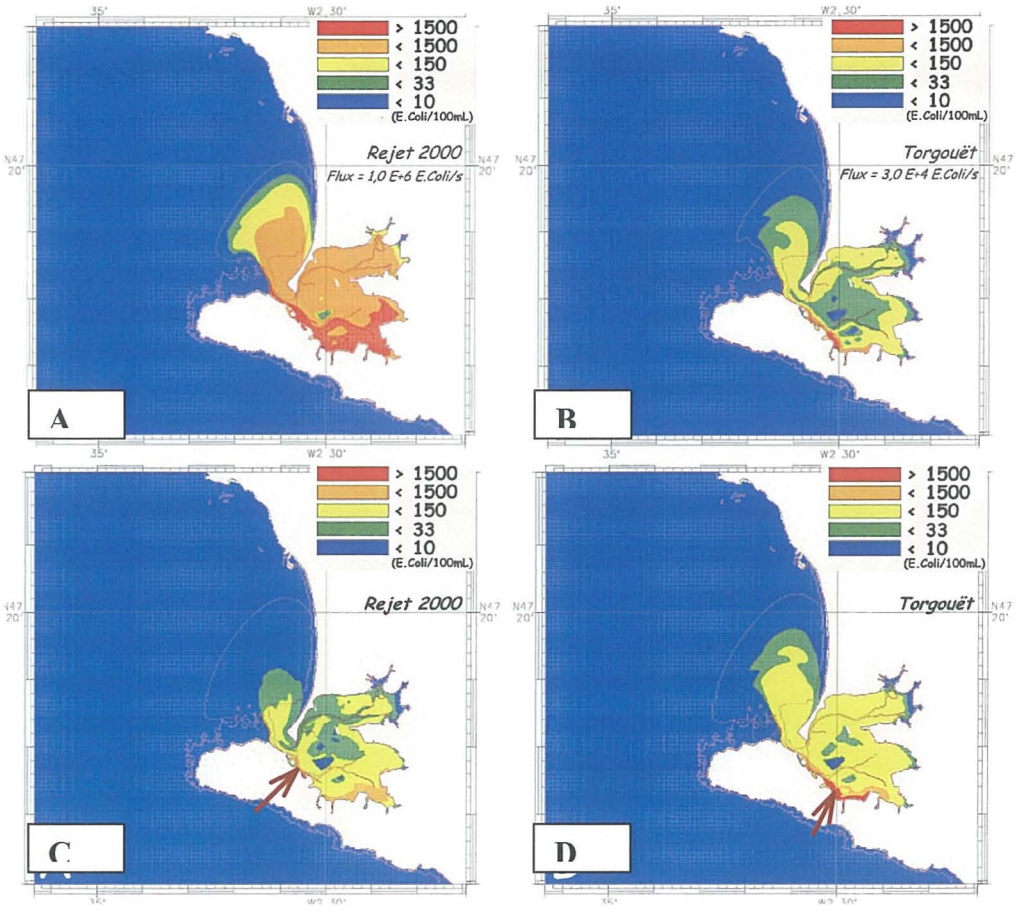


Figure 20. Concentrations moyennes calculées sur un cycle en fonction du point de rejet et pour un flux donné (vent nul, coefficient 70, A et B flux réels X 5000, C et D flux identiques 5.10^8 *E. coli*/s

Les résultats du scénario avec un flux identique à chaque rejet (Fig. 20, C et D) 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. 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 une très forte criticité 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.20B). 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 se trouve n'être finalement réellement impactant que pour le petit traict alors que les apports en provenance de Plinet vont être beaucoup plus diffusés sur l'ensemble du site.

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 et Buchet (2002, 2003), s'avère être judicieux, et peut être considéré comme validé par l'étude hydrodynamique réalisée.

Toutefois, les flux bactériens enregistrés 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 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 40h ou 100h. 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.

3.4.2. Devenir des bactéries dans le 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 confrontées, 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. Les points de suivi situés sur cette zone sont au nombre de 5 et sont rappelés sur la figure 21.

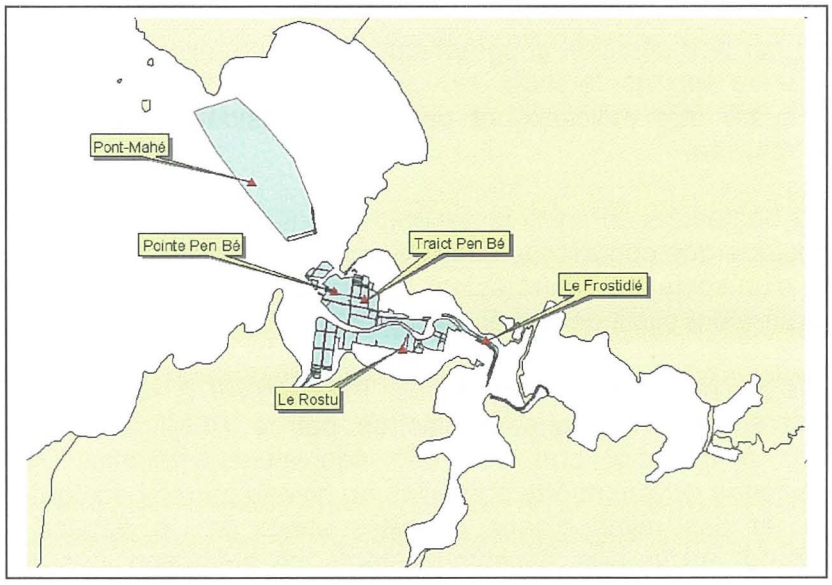


Figure 21. Points de surveillance REMI et cadastre conchylicole dans les traicts de Pen-Bé

Une première simulation a été effectuée à coefficient de marée constant et égal à 95, pour un vent WSW de module 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. 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 simulation montre bien une succession décroissante des valeurs entre le *Frostidié*, *le Rostu* et *Pointe 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.
Pour tenter de reproduire encore plus fidèlement les résultats observés par le REMI, des rejets d'eaux pluviales ont été introduits dans le modèle ; la modélisation indique qu'ils ne représentent qu'un apport complémentaire, qui reste négligeable par rapport à l'étier de Pont d'Arm, ce qui permet de valider le choix de ce point unique pour l'évaluation des apports bactériologiques.

3.4.3. 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. Pour le milieu marin, elles ne sont encore qu'indicatives, 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 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.

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 Lancly-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 (Tableau 5). Les données 2004 du sémaphore du Talut ont été utilisées.

	R2000	Torgouët	Plinet	Lancly
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**			

tableau 5. Flux extrêmes de diuron mesurés sur le bassin versant guérandais pour l'année 2004

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 7 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 (tableau 6 et zones rouges figure 22).
Cependant, il s'agit de zones très localisées, à proximité immédiate des principaux exutoires que sont Rejet 2000 et Lancly.

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*

tableau 6. Concentrations extrêmes calculées sur la zone des traicts du Croisic

La figure 22 représente les concentrations maximales en diuron en période de crue. Et montre un impact significatif de cette substance dans les traicts. En revanche, l'impact est très faible sur l'ensemble de la zone en période d'étiage.

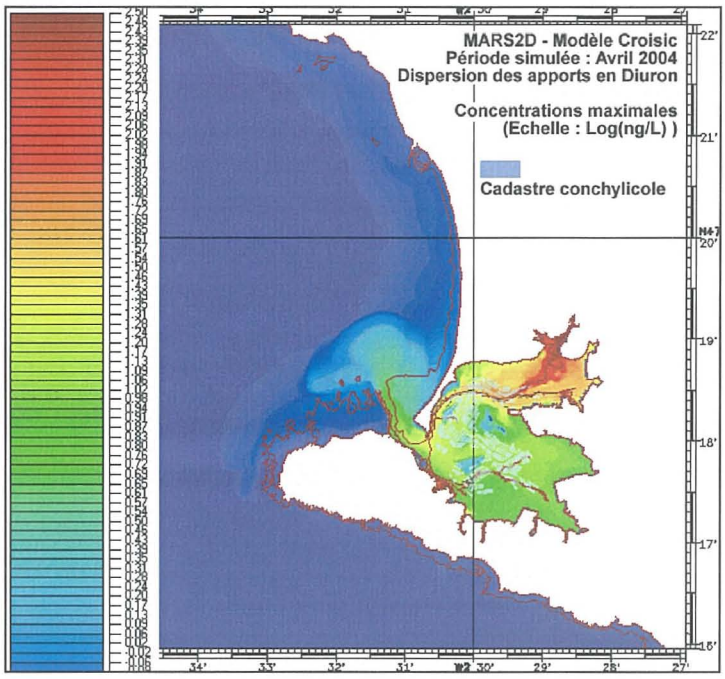


Figure 22. Concentrations maximales en diuron simulées par le logiciel MARS-2D en période de crue

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.

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 §1.2.3.
Des données du suivi de la qualité des eaux de la Loire sont disponibles sur Internet **[I6]**. Cependant, les données disponibles les plus récentes sont celles de 2002. On utilise donc, dans l'hypothèse de conditions hydrologiques et de concentrations en substances dissoutes similaires entre 2002 et 2004 (ce qui n'est probablement pas réaliste), 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 6,2µg/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 semble plus dépendante des apports terrigènes que ligériens (dans l'hypothèse d'apports similaires en 2002 et 2004).
Les comparaisons présentées sont réalisées pour les dates du 26 avril et du 3 Mai 2004. Les valeurs de salinité mesurées par le REPHY et calculées 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 30ng/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 Lancly. 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 = 6200 ng/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 14ng/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 6ng/L et 11ng/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.

Dispersion dans les traicts de Pen-Bé
Les conditions hydrologiques et météorologiques des périodes simulées sont résumées dans le tableau 7 :

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

tableau 7. Paramètres environnementaux des périodes simulées

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 n'ont été détectées ou recherchées qu'une fois dans l'étier de Pont d'Arm. 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 8. 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.

		Diuron	Isoproturon	Atrazine	Chlorfenvinphos (*)
Flux mesurés à Pont d'Arm au cours du suivi (g/jour)		1,6 ~ 70,5	0,9 ~ 25,8	1,2 ~ 12 (**)	6,1 ~ 35(**)
NQE (ng/L)		***200***	***320***	***600***	***60***
Concentrations calculées sur la zone des traicts (ng/L)	*Etiage*	*0,004 ~ 7*	*0,002 ~ 4*	*0,003 ~ 5*	*0,01 ~ 25*
	Crue	*0,2 ~ 130*	*0,08 ~ 47*	*0,04 ~ 22 (**)*	*0,1 ~ **64** (**)*

(*) Recherché une seule fois (**) Flux théorique

tableau 8. Concentrations extrêmes calculées sur le secteur de Pen-Bé (Baie de Pont-Mahé et zone des traicts)

La figure 23 présente les concentrations en atrazine simulées par le logiciel MARS-2D à pleine mer en période de crue. Les concentrations que l'on peut s'attendre à relever au niveau des concessions conchylicoles situées plus en aval sont alors de l'ordre de 2 ou 3ng/L. Ces valeurs sont bien inférieures aux normes de qualité environnementale provisoires, de même que pour les concentrations extrêmes calculées pour chacune des quatre substances étudiées (Tableau 8).

Les concessions sont globalement situées, à pleine mer, dans une zone de bonne qualité, dans le cas d'un apport unique par l'étier de Pont d'Arm.

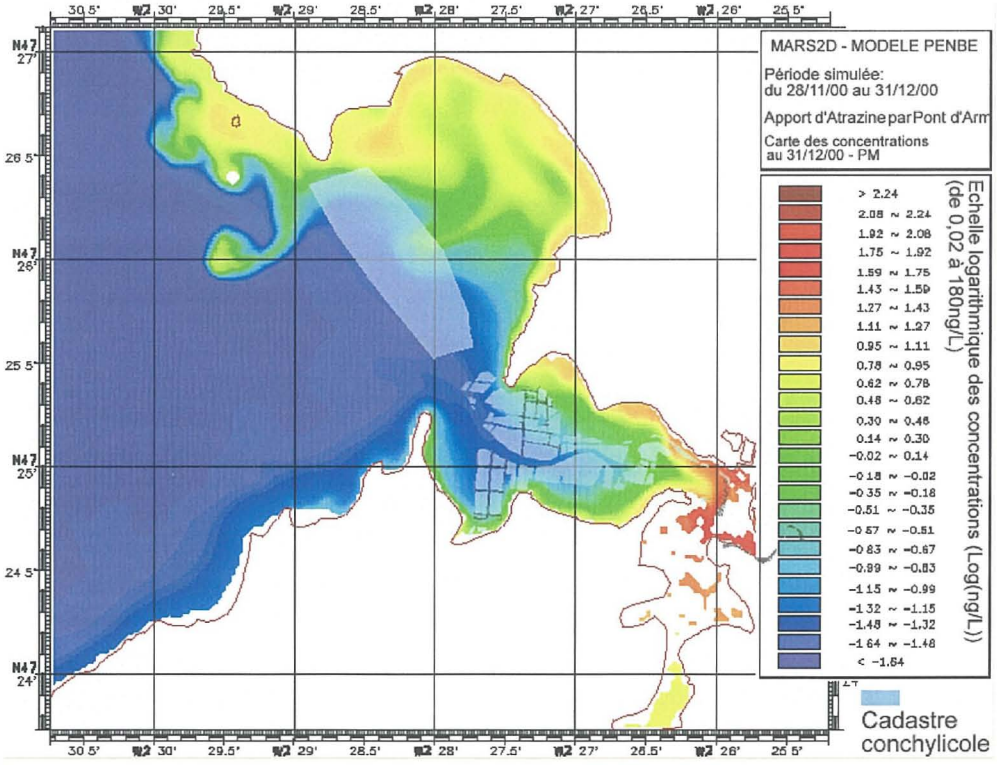


Figure 23. Concentrations en atrazine simulées par le logiciel MARS-2D à pleine mer en période de crue – Cadastre conchylicole en surimpression

De ces résultats (Tableau 8), on peut déduire une concentration seuil(*) au-delà de laquelle une partie du secteur se retrouve hors de ces normes. Elles sont présentées dans le tableau

(*)Ces valeurs doivent être maniées avec précaution, et notamment n'être utilisées qu'en termes d'apports (Débit*Concentration).

9 et données pour des débits d'étiage et de crue, respectivement égaux à 500 L/s et 2000 L/s. Les concentrations sont cette fois données en µg/L (10^{-6}g/L). A titre de comparaison, le flux de Diuron mesuré en période de crue (70g/j), revient (toujours en termes d'apports) à une concentration égale à 0,41 µg/L une fois ramené à un débit de 2000L/s. La norme de qualité environnementale peut donc être rapidement atteinte (concentration seuil égale à 0,64 µg/L).

		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*

tableau 9. Concentrations seuil calculées en Baie de Pont-Mahé et sur la zone des traicts

Afin d'évaluer l'impact respectif de l'étier de Pont d'Arm et de la Vilaine sur la contamination du traict de Pen-Bé par les phytosanitaires, les simulations du §1.2.4 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.

Deux simulations, correspondant à deux situations hydrologiques distinctes, ont donc 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 10. Pour le diuron, les concentrations utilisées correspondent aux valeurs enregistrées pendant l'étude. L'atrazine n'a pas été détectée à Pont d'Arm, mais du fait de sa présence dans la Vilaine, une concentration théorique identique à celle de la Vilaine a été simulée.

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	Atrazine	70	- (**) Test à 70

tableau 10. Paramètres environnementaux des périodes simulées

Le résultat des simulations (tableau 11) 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 favorables au transfert de polluants (WNW).

* 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 égal à 20ng/L.

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

tableau 11. Concentrations calculées en Baie de Pont-Mahé et sur la zone des traicts

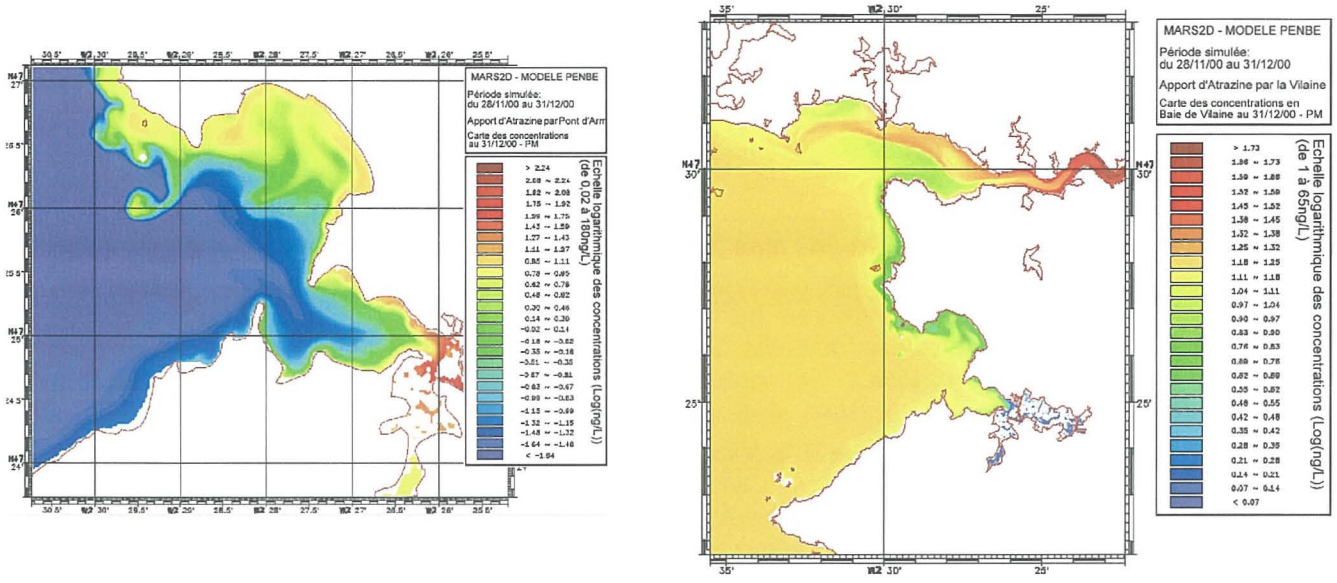


Figure 24. Apports de l'étier de Pont d'Arm et de la Vilaine en période de crue

3.5. Stocks conchylicoles

3.5.1. Estimation des stocks de coques dans les traicts du Croisic et évolution dans le temps

Les surfaces de chaque strate sont très inégales (Fig. 12 p. 19) 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.

		Stock (t)			Densité (t/ha)		
Strate	Surface (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

tableau 12. Etat des stocks et des biomasses de coques de juin 2001 à janvier 2002

En juin 2001, les densités d'élevage montrent une importante disparité entre les strates étudiées. L'effet cultural (semis ou absence de semis) 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 mais de nature sédimentaire différente. Ainsi, pour les parcelles ensemencées, les densités d'élevage sont supérieures en sol sableux qu'en sol sablo-vaseux. A contrario, les concessions non semées offrent de meilleurs rendements pour un sol sablo-vaseux que sableux. 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. 3 p.5), ce qui va de pair avec une forte teneur des sédiments en sable, propice à l'élevage des coques.

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. La figure 22 permet d'apprécier cette évolution.
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. 25).

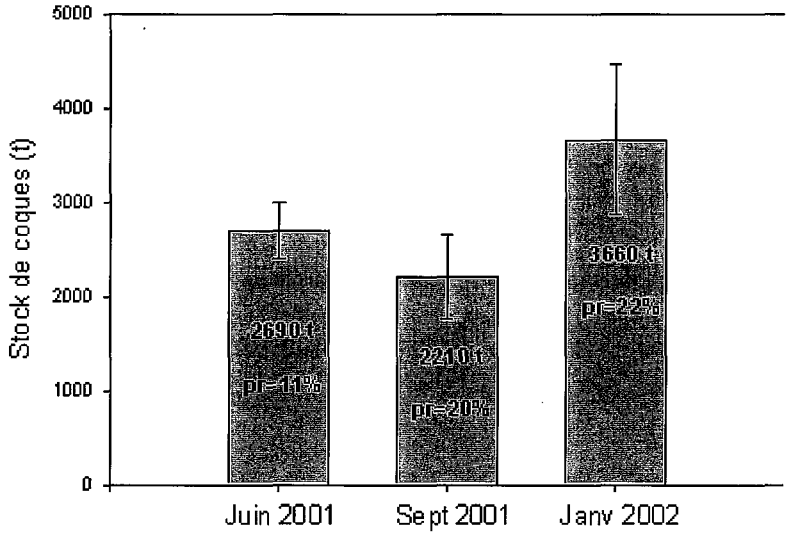


Figure 25. Evolution de la biomasse de coques en élevage

La stratégie culturale utilisée par la profession peut reposer sur un semis de naissain de coques, en provenance de l'estuaire de la Vilaine, qui peut s'étaler de l'automne à la fin de l'hiver ou 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 40 t/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 mais il est difficile d'en 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. 26).

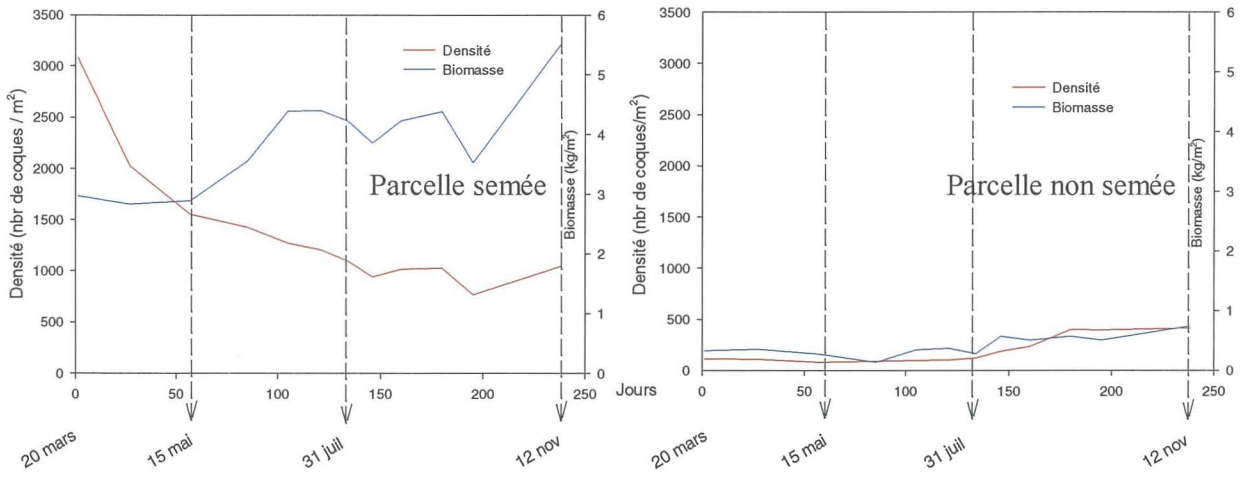


Figure 26. Evolution des biomasses et des densités de coques sur les deux parcelles étudiées.

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 . 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 de coques supérieures à 27 mm (taille marchande) alors que le mode 22 à 27 mm est largement approvisionné.

3.5.2. 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.

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%).

	Stock (tonnes)	lineaire (km)	densité(kg/m)	% longueur
Poches 1 an	**299.1**	17.5	17.1	17.8
Poches 2 ans	**1412.7**	62.5	22.6	63.6
Coll 1 an	**0**	0.0	0.0	0.0
Coll 2 ans	**0**	0.0	0.0	0.0
tables vides	**0**	18.3	0.0	18.6
captage	**0**	0.0	0.0	0.0
total	**1711.8**	**98.3**	**17.4**	100.0
biom/m²	**17.4**			
surf strate ha	31.72			
taux occup	0.31			

tableau 13. Résultats de l'estimation des stocks d'huîtres dans le traict de Pen-Bé.

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 (Tableau 6), donnant ainsi un caractère de « bassin finisseur » à ce site.

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.

3.5.3. Estimation du stock 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 ± 20 % (Tableau 14).

	P1	*P2*	*P4*	*P5*	*P6*	*P7*	*Total*
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**

tableau 14. Résultats de l'estimation des stocks de moules dans le traict de Pen-Bé

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%.
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.

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 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 Lequer, 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 fin 2005.
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 sur plus de 10 ans 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 intranet 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. 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.
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 restent 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 sont très faibles voire inexistants 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 le diuron, 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 à l'étiage.
La quantité d'eau douce provenant de l'estuaire de la Loire contribue pour 75 à 90% à la dessalure observée dans les traicts du Croisic. Toutefois les polluants dissous sont beaucoup plus concentrés dans les étiers que dans le panache de la Loire, et la contribution de la Loire aux apports de diuron serait de 15 à 50% selon les conditions météorologiques et hydrologiques. Ce résultat préliminaire doit toutefois être considéré avec précaution dans la mesure où il est évalué à partir d'une méthode indirecte, l'estuaire de la Loire n'étant pas inclus dans l'emprise du modèle 2D du Croisic.

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 d'élevage. D'autre part, il semblerait que le pourcentage d'animaux atteignant la taille marchande (27 mm) en fin d'élevage soit faible. L'arrivée du naissain local peut encore expliquer ce phénomène par l'expulsion des plus gros individus. 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 (Lancly, Plinet, Pont d'Arm) permettraient de mieux cerner le fonctionnement hydrologique des étiers et d'approcher au mieux les débits 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 Lancly et Plinet. Seules les périodes d'épandage seraient ciblées, avec dans un premier temps un échantillonnage bimensuel, voire hebdomadaire.
- 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) compléteraient 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.

- Le couplage du modèle hydrologique SWAT avec le modèle hydrodynamique MARS-2D développé par l'Ifremer dans les traicts semble une perspective intéressante. 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. La figure 27représente l'évolution, à 24 heures d'intervalle, des flux et concentrations en *E.coli* respectivement sur les bassins versants et dans les traicts du Croisic. L'événement simulé est un apport bactériologique massif, associé à une forte pluviométrie, à la date du 7 juillet 2004. 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.

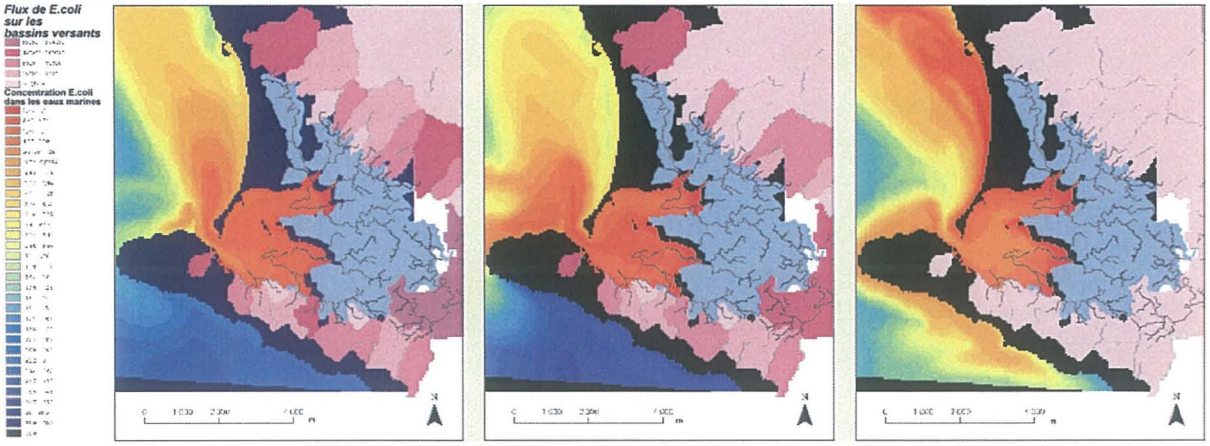
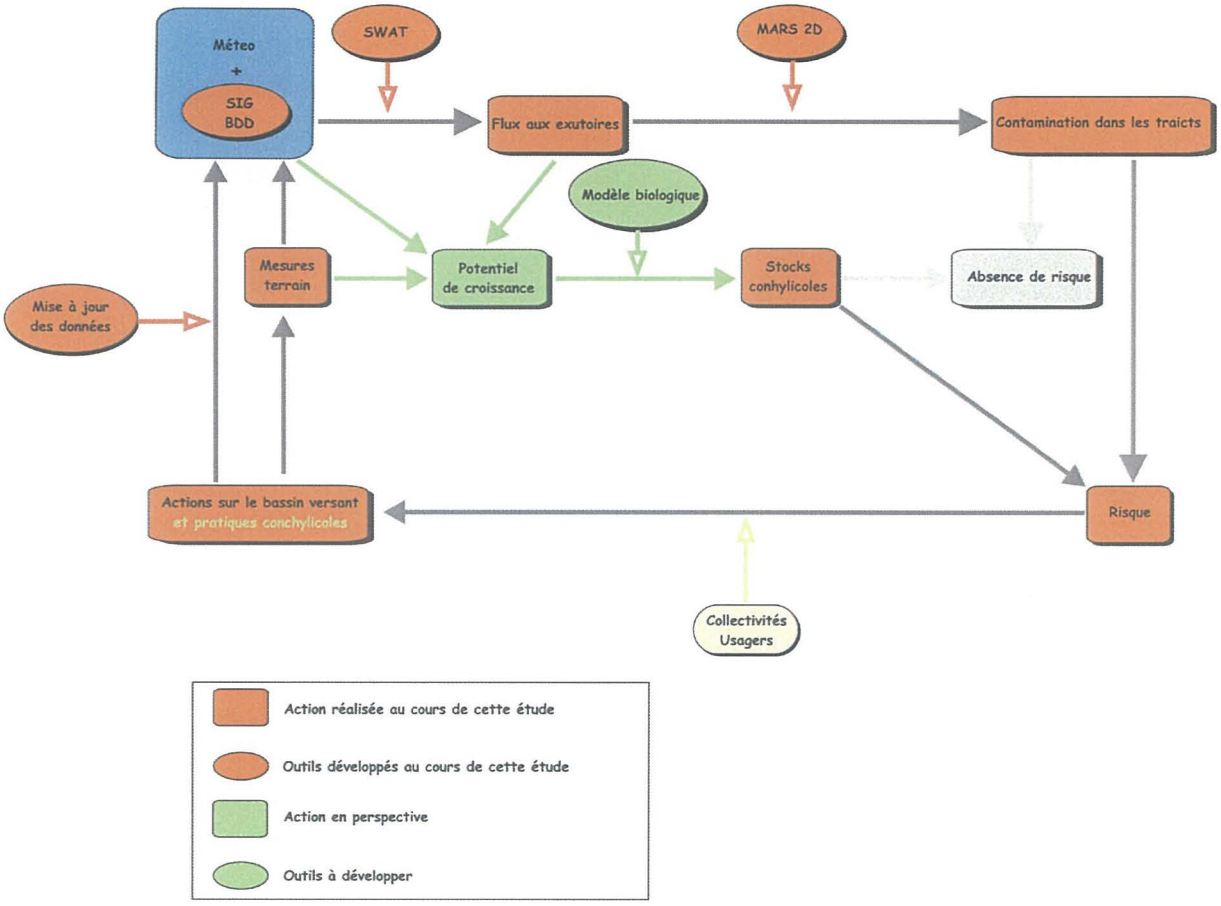


Figure 27. Intégration des résultats du modèle MARS – Simulation d'un apport bactériologique important par les bassins versants dans les traicts du Croisic.

- 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 être 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 le schéma ci-dessous) 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.



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-Odoux C., Squividant 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. Deslous-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. 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.

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 *Cerastoderma 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.

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, 57 p + annexes.

CA, 2003. Données sur l'Agriculture. CAP Atlantique, 2003.

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

CAP Atlantique, laboratoire de Pen-Avel 2000, 2001 et 2002. Données sur la qualité des étiers.

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

CCI, 2003. Etude diagnostic du territoire de la Communauté d'Agglomération CAP Atlantique. Rapport CAP Atlantique, 8 p.

CODELA, 2003. CAP Atlantique : Etat des lieux socio-économique. Rapport CAP Atlantique, 38 p.

CREPEPP (2003) : Bilan du Comité plénier

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

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-Brieuc (Manche-Ouest), *IFREMER DERO-EL/89-25*, 173p.

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

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 Mines de Saint-Étienne et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 357 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.

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, 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.

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.

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.

Liste des abréviations et des sigles

AFNOR : Association Française de NORmalisation
BD : Base de Données
CA : Chambre d'Agriculture
CAP Atlantique : Communauté d'Agglomération de la Presqu'île de Guérande Atlantique
CCI : Chambre de Commerce et de l'Industrie
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
DCE : Directive Cadre sur l'Eau
DDASS : Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales
DDE : Direction Départementale de l'Equipement
IAV : Institution d'Aménagement de la Vilaine
Ifremer : Institut français pour l'exploitation de la mer
IGN : Institut Géographique National
LCPL : Laboratoire Conchylicole des Pays de Loire, Ifremer Bouin
LIDAR : Light Detection And Ranging
MCD : Modèle Conceptuel de Données
MES : Matières En Suspension
MPL : laboratoire Morbihan – Pays de Loire, Ifremer Nantes
NQE : Norme de Qualité Environnementale
PSU : Practical Salinity Unit (unité de mesure de la salinité)
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
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
SWAT : Soil and Water Assessment Tool